



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

OSMOTICKÉ ELEKTRÁRNY

OSMOTIC POWER PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FRANTIŠEK ŠIKULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LADISLAV ŠNAJDÁREK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): František Šikula

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Osmotické elektrárny

v anglickém jazyce:

Osmotic power plants

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis současné komerčně dostupné technologie reverzní osmózy a její využití pro výrobu elektrické energie.

Analýza současného stavu osmotických elektráren a potenciál jejich využití.

Provést zjednodušený návrhový výpočet osmotické elektrárny pro vybranou lokalitu.

Cíle bakalářské práce:

Analýza současného stavu využití reverzní osmózy pro produkci elektrické energie.

Popis principu reverzní osmózy spolu s konkrétním uspořádáním.

Koncepční návrh osmotické elektrárny se zjednodušeným návrhovým výpočtem.

Seznam odborné literatury:

MCNAUGHT, Alan D a Andrew WILKINSON. Compendium of chemical terminology: IUPAC recommendations. 2nd ed. Malden, MA, USA: Blackwell Science, 1997. ISBN 08-654-2684-8.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE SYSTEM MODELING AND SIMULATION, LSMS 2010. Life system modeling and intelligent computing. Berlin: Springer. ISBN 978-364-2158-582.

KHEDR, Gamal. Nanofiltration and Low Energy Reverse Osmosis for Advanced Wastewaters Treatment. Expanding Issues in Desalination. InTech, 2011-09-22. DOI: 10.5772/22914. Dostupné z:

<http://www.intechopen.com/books/expanding-issues-in-desalination/nanofiltration-and-low-energy-reverse-osmosis-for-advanced-wastewaters-treatment>

databáze: www.sciencedirect.com, www.webofknowledge.com

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Šnajdárek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá teoretickým popisem a hlubší analýzou osmotických elektráren a vhodnosti jejich využití jako alternativního zdroje pro výrobu elektřiny. V první části jsou vysvětleny základní principy získávání energie pomocí reverzní osmózy. V další části jsou popsány vlastnosti této elektrárny, a to od jejího potencionálního umístění, přes úpravnu vody až po membránové jednotky. Poslední část se věnuje návrhu elektrárny pro zvolenou lokaci. V návrhu jsou určeny přibližné náklady na výstavbu pro vybranou lokalitu ve Skotsku. V závěru byla zjištěna aktuální finanční nevýhodnost stavby této elektrárny.

Klíčová slova

Osmotická elektrárna, předběžný návrh, reverzní osmóza, reverzní elektrická dialýza, PRO

Abstract

The main purpose of this bachelor thesis is a theoretical description and an analysis of osmotic plants, mainly their suitability for being used as an alternative source for energy making.

In the first part of this thesis are explained elementary principles of converting osmotic power to energy. In the next part are presented main characteristic features of an osmotic power plant. This section consist of description of its potential location, of water pre-treatment and of membranes units. The last section of this thesis consists of a case study, which analyses a potential osmotic power plant located in Scotland. In this case study are summarized all assumed approximate costs of this power plant. In the conclusion was proved that nowadays osmotic power plants are not financially favorable.

Key words

Osmotic power plant, case study, reverses osmosis, reverse electro dialysis, PRO

Bibliografická citace

ŠIKULA, F. Osmotické elektrárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek.

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Osmotické elektrárny zpracoval sám. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 29. 5. 2014

František Šíkula

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Ladislavu Šnajdárkovi za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své matce a přátelům za podporu nejen při studiu.

Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	Základní principy.....	15
2.1	Historie.....	15
2.2	Osmóza.....	15
2.3	Osmotický tlak.....	16
2.4	Osmotické jevy.....	16
2.4.1	Osmóza (Forward osmosis).....	16
2.4.2	Reverzní osmóza.....	16
2.4.3	Pressure Retarded Osmosis (PRO).....	17
2.5	Osmotická energie.....	17
2.6	Reverzní elektrická dialýza (Reverse electro dialysis).....	18
2.6.1	Teorie.....	18
3.	Osmotická elektrárna.....	21
3.1	Kapacita osmotické elektrárny.....	21
3.2	Vhodnost lokace.....	22
3.2.1	Konstantní gradient slanosti.....	22
3.2.2	Neustálý tok vstupních látek.....	22
3.3	Konstrukce elektrárny.....	22
3.4	Úprava vody.....	23
3.5	Membrány.....	23
3.5.1	Výkon membrán.....	23
3.5.2	Concentration polarization (Koncentrační polarizace).....	23
3.5.3	Typy membrán.....	25
3.5.4	Porovnání výkonu membrán.....	26
3.6	Současný stav a následující vývoj.....	27
3.7	Globální potenciál.....	27
3.8	Dopad na životní prostředí.....	28
4.	Zjednodušený výpočet osmotické elektrárny.....	29
4.1	Volba lokace.....	29
4.1.1	Přehled britské energetiky.....	29
4.1.2	Hydrologie Velké Británie.....	29
4.1.3	Podmínky pro vhodnou lokaci.....	29
4.2	Řeka Tay.....	30
4.2.1	Dostupnost čerstvé vody.....	31
4.2.2	Salinita.....	32
4.2.3	Teplota.....	34

4.2.4	Teoretický osmotický tlak	34
4.2.5	Praktický rozdíl v osmotickém tlaku	35
4.2.6	Praktická osmotická energie	35
4.3	Průtoky	36
4.3.1	Průtok říční vody	36
4.3.2	Průtok mořské vody	37
4.3.3	Průtok brakické vody	37
4.4	Produkce energie	38
4.5	Vstupní a výstupní systémy	38
4.5.1	Typy odběrných stanic	39
4.5.2	Umístění odběrných stanic	39
4.5.3	Konstrukce vstupních a výstupních systému	39
4.5.4	Celkové náklady	41
4.6	Úprava vody	42
4.6.1	Typy úpravy vod	42
4.6.2	Výběr typu úpravy vody	43
4.6.3	Celková cena	43
4.6.4	Ztráty energie	44
4.7	Membránové systémy	44
4.7.1	Základní návrh konstrukce	44
4.7.2	Charakteristika membrány	45
4.7.3	Určení počtu soustav	45
4.7.4	Plocha potřebná pro membránové soustavy	46
4.7.5	Celková cena	46
4.7.6	Ztráty energie	46
4.8	Čerpadla a turbíny	46
4.8.1	Čerpadla	47
4.8.2	Turbíny	47
4.8.3	Výpočet potrubí	47
4.8.4	Náklady na jednotlivé části	49
4.8.5	Celkové náklady	50
4.8.6	Ztráty energie	50
4.9	Dodávána energie do sítě	51
4.10	Shrnutí nákladů	51
5.	Závěr	53
6.	Seznam použitých zdrojů	55
7.	Seznam použitých symbolů a zkratk	59
8.	Seznam obrázků a tabulek	62

1. Úvod

V dnešním světě dominují při výrobě energie fosilní paliva. Ovšem s touto produkcí energie je většinou spojena i tvorba skleníkových plynů. Proto se čím dál častěji objevují elektrárny pracující s obnovitelnými zdroji energie. Ať už se jedná o elektrárny větrné, vodní či solární, přesto pokračuje hledání po dalších zdrojích, které by se daly využívat. Jedním z těchto návrhů jsou i osmotické elektrárny.

Osmotické elektrárny jsou moderním konceptem nového obnovitelného zdroje energie. Tento návrh počítá se stavbou elektráren v oblasti ústí do moří a s využíváním energie z rozdílu slanosti mezi říční a mořskou vodou. Stavba velkých osmotických elektráren je však ještě dalekou budoucností, přestože se v posledních letech vývoj získávání energie posunul velkými kroky dopředu, včetně otevření prototypu této elektrárny v Norsku.

V první části této bakalářské práce bude představen a vysvětlen koncept získávání energie pomocí osmózy z teoretického hlediska. Rozebrány budou například pojmy osmóza a osmotický tlak a jak z těchto přírodních jevů, získávat energii.

V další části bude rozebrán návrh elektrárny. Budou objasněny potenciaální lokace, použitelní membrány, dopad na životní prostředí a jiné.

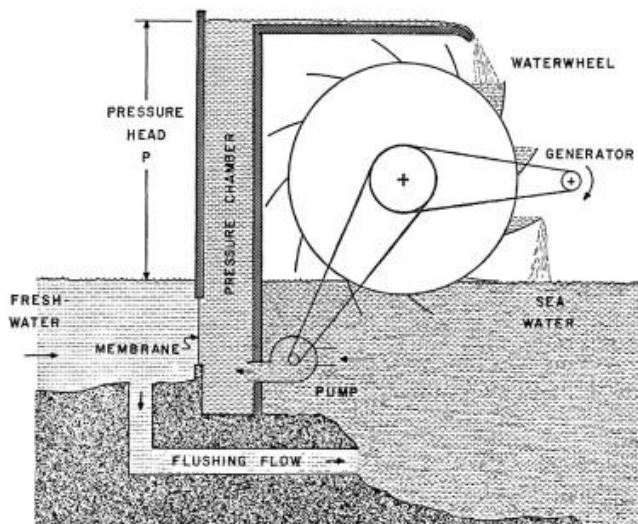
Největší část práce zabírá samotný zjednodušený návrh osmotické elektrárny pro vybranou lokalitu. Tento návrh je zjednodušený, ale přesto dává náhled, v jakém stavu se nachází technologie na stavbu této elektrárny a jaká je její finanční výhodnost.

2. Základní principy

2.1 Historie

Osmotický jev byl poprvé zpozorován francouzským knězem a fyzikem Jean-Antoine Nollem v roce 1784, který vzal prasečí měchýř napuštěný vínem a ponořil ho do barelu s vodou. Pozoroval, že voda v nádrži je schopná přes měchýř protéct víno však nikoliv. Toto vedlo ke zvýšení tlaku v měchýři a následnému prasknutí. Během následujících 150 let byl osmotický jev pozorován v laboratořích a dále vyvíjen. Měchýř za nedlouho nahradila membrána a až objevy holandského vědce Jacoba Henrika van't Hoffa, který stanovil základní rovnici osmotického tlaku, dnes známou právě jako van't Hoffova rovnice. Za tento objev si v roce 1902 odnesl Nobelovu cenu za chemii. [1]

Poprvé se koncept získávání energie z míšení sladké a slané vody objevil v časopise *Nature* v roce 1954. Ovšem tento článek nevyvolal zájem a zůstal nepovšimnut širokou vědeckou obcí dalších 20 let. Během ropné krize v sedmdesátých letech se zájem o hledání alternativních zdrojů energie obnovil. V roce 1974 se objevuje první návrh na získávání energie z moře za pomoci osmotické energie. V tomto období se taky objevily první výsledky experimentů, avšak vývoj se opět pozastavil a až do roku 1997 s vyhlášením Kjótských protokolů zaznamenáváme pouze minimální vývoj této technologie. [2]



Obr. 1: První návrh na získávání energie za pomoci osmózy [7]

Jedním z vědců, který se výrazně zajímal o osmotický jev, byl Sidney Loeb. Loeb je považován za zakladatele moderní membránové technologie. Jeho průlomová myšlenka na odsolování mořské vody spočívala ve využití reverzní osmózy. Díky vysoké propustnosti a velkému procentu redukce soli se tato technologie brzy začala používat v odsolovacích závodech po celém světě. Reverzní osmóza se později stala hlavním principem k osmotickým elektrárnám. [3]

2.2 Osmóza

Osmóza obecně nastává, pokud máme dva roztoky s rozdílnou koncentrací jako například mořskou a sladkou vodou, oddělené polopropustnou membránou, která umožňuje průchod pouze roztoku s nižší koncentrací. V našem případě sladká voda, projde skrz membránu do roztoku s vyšší koncentrací. Tento prostup pokračuje, dokud se rozdíl koncentrací nevyrovná nebo tlak na straně vyšší koncentrace bude dostatečně velký, aby zastavil tento prostup. Z tohoto principu vychází definice osmózy. [4]

Osmóza je spontánní přechod molekul nebo difuze vody či jiných rozpouštědel skrz polopropustnou membránu. [5]

2.3 Osmotický tlak

Je to přetlak potřebný k vytvoření osmotické rovnováhy mezi roztokem a čistým rozpouštědlem oddělených polopropustnou membránou, která umožňuje propouštění pouze pro rozpouštědla. [6]

$$\pi = -\frac{RT}{V_A} \ln a_A \quad (1.1)$$

Toto je případ pro nestlačitelnou kapalinu, kde V_A , a_A jsou parciální molární objem a aktivita rozpouštědla A. Pro ideální kapalinu se používá rovnice:

$$\pi = c_B RT = \rho_B \frac{RT}{M_B} \quad (1.2)$$

Kde entity B jsou samostatně se pohybující částice roztoku například molekuly, ionty a jiné nezávisle na jejich typu. c_B , ρ_B vyjadřuje množství a hmotnostní koncentraci rozpuštěných látek. M_B je průměrná molární hmotnost rozpuštěných látek. Množství je někdy vyjádřeno v osmolech. Osmol je jednotka vyjadřující množství molů osmoticky aktivních částic. Například pro styk sladké vody ($\Delta\Pi \approx 0$) a mořské vody obsahující molekuly chloridu sodného (NaCl). Při průměrné koncentraci NaCl v mořské vodě, která se pohybuje od 3% do 4% je osmotický tlak 25 – 33 barů pro teplotu 25 °C. Tato hodnota odpovídá vodnímu sloupci o výšce 250 m. [4][6]

2.4 Osmotické jevy

Pro všechny osmotické jevy platí, že potencionální proudění vody mezi dvěma roztoky můžeme vyjádřit jako funkci závislou na rozdílu potencionálního osmotického tlaku $\Delta\pi$ vyjádřeného v rovnici (1.2), rozdílu hydrostatického tlaku obou roztoků ΔP a koeficientů membrány A .

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1.3)$$

2.4.1 Osmóza (Forward osmosis)

U osmózy se proudění uskutečňuje pouze za pomoci rozdílu osmotického tlaku, z toho vyplývá, že $\Delta P = 0$.

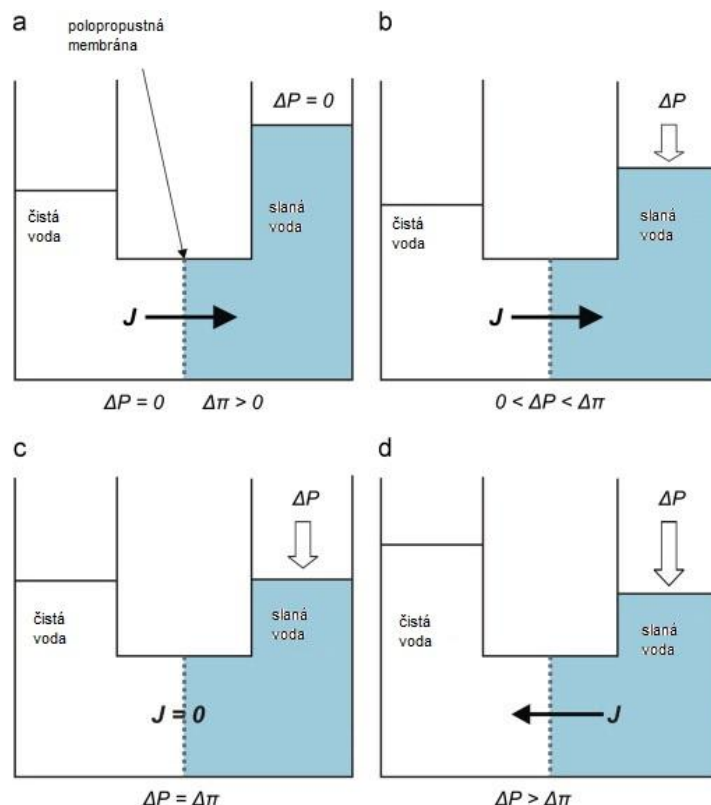
2.4.2 Reverzní osmóza

U reverzní osmózy se využívá podmínky $\Delta\pi < \Delta P$. Když je dosaženo tohoto stavu, například zvýšením hydrostatického tlaku mořské vody, pak začnou molekuly vody proudit opačným směrem, to je ze slané vody do čisté. Nazývá se reverzní, protože voda proudí opačným směrem oproti přírodnímu osmotickému jevu. Na tomto principu pracují moderní odsolovací závody po celém světě. Mořská voda se přivádí pod tlakem k polopropustné membráně.

Ta zastavuje molekuly soli a propouští pouze molekuly vody. Takto získané množství čerstvé vody putuje ke koncovému zákazníkovi.[4]

2.4.3 Pressure Retarded Osmosis (PRO)

PRO je základním principem pro získávání energie za pomoci osmózy. Na tento osmotický jev může být nahlíženo jako na jev mezi reverzní a dopřednou osmózou. Aby tento jev nastal, musíme zvýšit hydrostatický tlak na straně více koncentrovaného roztoku a to do hodnot $0 < \Delta P < \Delta \pi$. Hnací silou přestupu molekul je stejně jako u FO rozdíl v osmotickém tlaku, avšak pokračuje pouze do doby, dokud je rozdíl v osmotickém tlaku větší než rozdíl v hydrostatickém. [4],[8]



Obr. 2: Přehled čtyř osmotických jevů [4]

2.5 Osmotická energie

Proudění vody vyjádřené v rovnici (1.3) je funkcí rozdílu potenciálního osmotického tlaku a hydrostatického tlaku s přihlédnutím na propustnost membrány. Potenciální energie, kterou lze pomocí PRO získat, je vyjádřena rovnicí:

$$W = J_w \Delta P = A(\Delta\pi - \Delta P)\Delta P \quad (1.4)$$

W je zde výkon udáván ve Watech na jednotku plochy membrány. Pokud derivujeme rovnici (1.4) podle ΔP a položíme ji rovno nule, získáváme, že maximální hodnota výkonu W nastává pro $\Delta P = \frac{\Delta\pi}{2}$ pokud dosadíme tento výsledek do rovnice (1.4) za ΔP , dostaneme rovnici:

$$W_{max} = A \frac{\pi^2}{4} \quad (1.5)$$

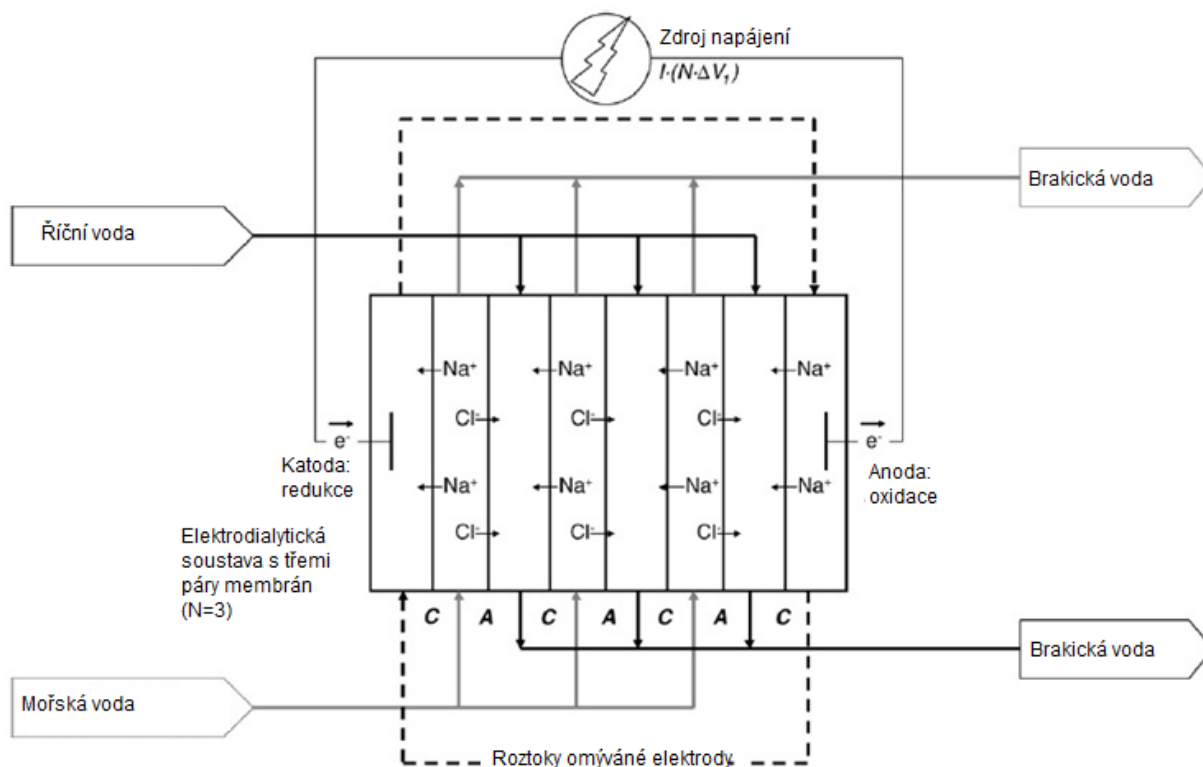
Například pro míšení mořské a sladké vody je potenciaální osmotický tlak 26 barů a optimální pracovní tlak pro PRO systém je polovina, tedy 13 barů. [4]

Protože průběh PRO je limitován, je limitováno také získávání energie. Proto je důležité, aby nikdy nedošlo k osmotické rovnováze a tím pádem k zastavení osmotického toku. K udržení trvalého potenciálu k získávání energie se dosáhne neustálým tokem vstupních kapalin a odtokem výstupní kapaliny.[1]

2.6 Reverzní elektrická dialýza (Reverse electro dialysis)

Reverzní elektrická dialýza (RED) je proces využívající rozdíl v elektrochemickém potenciálu dvou roztoků pro generování elektřiny. Na rozdíl od PRO reverzní elektrická dialýza využívá ne polopropustné membrány ale ion-selektivní membrány. První zmínky o RED se objevují v 50. letech 20. století jako reverzní proces k elektrodialýze, která se používá v odsolovacích závodech jako alternativa k reverzní osmóze.

Při RED používáme dva typy membrán. Membránu akceptující anionty a membránu akceptující kationty. Tyto dva druhy membrány jsou na sebe střídavě naskládány mezi katodou a anodou. Do této sestavy je přiváděna slaná a sladká voda. Díky rozdílným koncentracím a selektivním membránám se elektrochemický potenciál generuje ihned. Rozdíl elektrochemického potenciálu vzniká tím, že se všechny záporné ionty pohybují jedním směrem a kladné opačným.[1],[9]



Obr. 3: Schéma RED [1]

2.6.1 Teorie

Pro Reverzní elektrickou dialýzu lze teoretickou hodnotu potenciálu mezi membránami spočítat pomocí Nerstovy rovnice:

$$\Delta V_{theo} = 2 \cdot \alpha \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \ln \left(\frac{a_{sea}}{a_{river}} \right) \quad (1.6)$$

Kde ΔV_{theo} je teoretický potenciál membrány, α je průměrná selektivita membrány vzhledem k aniontům a kationtům, R je univerzální plynová konstanta, T je absolutní teplota, z je valence iontů, F je Faradayova konstanta, a je aktivita obou roztoků, které jsou odlišeny indexem.

Celkový potenciál celého systému přes N páru membrán je poté dán rovnicí:

$$V^0 = N \Delta V_{theo} \quad (1.7)$$

Do výpočtu je důležité zahrnout odpor celé soustavy, ten můžeme definovat jako suma všech odporů jednotlivých komponentů:

$$R_{stack} = \frac{N}{A} \left(R_{aem} + R_{cem} + \frac{d_c}{\kappa_c} + \frac{d_d}{\kappa_d} \right) + R_{el} \quad (1.8)$$

Kde N je počet membránových dvojic, A je efektivní plocha membrán, R_{aem} je odpor membrány akceptující anionty, R_{cem} je odpor membrány akceptující kationty, d_c, d_d jsou jejich tloušťky. κ_c, κ_d jsou jejich konduktivity. R_{el} je odpor elektrody.

Finální výkon RED soustavy je definován za pomoci Kirchhoffových zákonů:

$$W = I^2 R_{load} = \frac{(V^0)^2 \cdot R_{load}}{(R_{stack} + R_{load})^2} \quad (1.9)$$

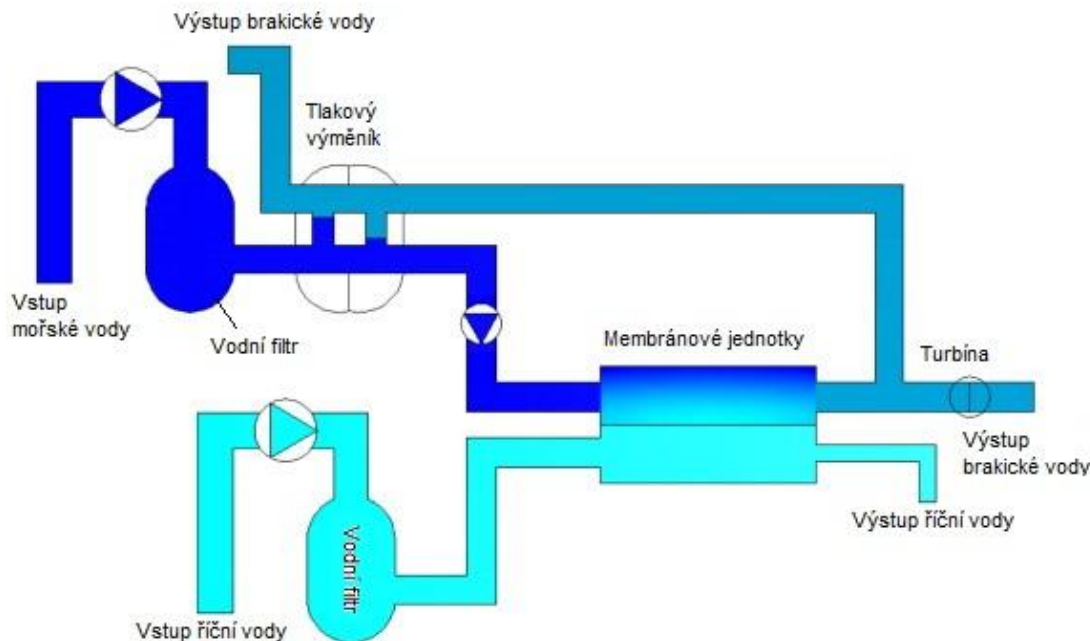
Kde I je proud a R_{load} je vstupní odpor. Aby byl výkon (zde W) maximální je potřeba, aby R_{load} bylo rovno R_{stack} . V tom případě se nám rovnice zjednoduší.

$$W_{max} = \frac{(V^0)^2}{4 \cdot R_{stack}} \quad (1.10)$$

Z rovnice vidíme, že maximální získaná energie principem RED je závislá na vlastnostech membrány a jejímu uspořádání. Stejně jako u PRO se získávání energie zastaví v okamžiku vyčerpání potenciálu mezi roztoky, stejně jako u PRO je toto řešeno neustálým tokem vstupních látek a odvádění odpadní látky. [9]

3. Osmotická elektrárna

V oblasti osmotických elektráren je vedoucí společností norská Statkraft, která má silnou tradici ve vodních elektrárnách. Tato společnost věří, že by se osmotická energie se mohla stát významným alternativním zdrojem energie. Statkraft v podstatě nastartoval technologický vývoj PRO technologie, za důvodu nalezení finančně efektivní výrobu energie. V roce 2009 Statkraft otevřel na jihu Norska, první osmotickou elektrárnu na světě. Tento prototyp měl dokázat, že lze generovat elektřinu a měl sloužit k testování různých typů membrán. Základní schéma osmotické elektrárny je vyjádřeno na následujícím obrázku.[9]



Obr. 4: Idealizované schéma osmotické elektrárny [9]

Na schématu vidíme dva vstupy a to sladké a slané vody. Sladká i slaná voda jsou přiváděny stejnosměrně nebo protisměrně k oběma stranám membrány. Část se sladkou vodou se vtačí do slané vody, a zároveň snižuje její slanost. Brakická voda pod vysokým tlakem se rozděluje na dva proudy. První napájí turbínu připojenou ke generátoru. Druhý proud se použije k tlakování příchozí slané vody v tlakovém výměníku. [10]

Brakická voda je odpadní produkt osmotické elektrárny. Brakická voda je voda, jejíž koncentrace soli je vyšší než koncentrace soli u sladké vody a zároveň nižší než koncentrace u mořské vody. Normálně se vyskytuje v oblasti ústí řek do moří.

3.1 Kapacita osmotické elektrárny

Ideální hydrostatický tlak je roven polovině osmotického tlaku mezi sladkou a slanou vodou, tedy zhruba 13 barům. Toto je však pouze teoretická hodnota počítající se 100% účinným okruhem elektrárny. Když vezmeme v potaz reálný výkon elektrárny, můžeme ho vyjádřit následující rovnicí:

$$P_{ele} = E_{real} Q_{fresh} \quad (2.1)$$

Kde E_{real} je reálná energie získána osmotickým procesem a Q_{fresh} je průtok sladké vody elektrárnou.

Účinnost celé elektrárny je poté ovlivněna mnoha faktory, mezi nejvýznamnější můžeme považovat ztráty tlaku na potrubí vedoucí mezi zdrojem vod do elektrárny. Dalším důležitým faktorem je rozmístění všech technologií v elektrárně a také napájení všech vstupních zdrojů (čerpadel). Dále je třeba počítat s účinností všech rotačních komponent (čerpadel, turbíny). Na účinnosti se projeví fakt, že dnešní membrány nejsou úplně polopropustné.[1][4]

3.2 Vhodnost lokace

Jako vhodná lokace pro stavbu osmotické elektrárny se logicky nabízí oblast ústí řek do moří, dále by měla tato lokace splňovat ty to základní podmínky:

1. rozdíl koncentrací dvou roztoků tak, aby při jejich míšení vznikal osmotický tlak na polopropustné membráně. Vysvětleno v sekci 2.3
2. Konstantní gradient slanosti
3. Neustálý tok vstupních látek

3.2.1 Konstantní gradient slanosti

Konstantní gradient slanosti je důležitý pro konstantní získávání energie. V rámci udržení konstantního gradientu slanosti je třeba udržet oddělené proudy. V našem případě se jedná o vstupní proud sladké a slané vody a výstupní proud brakické vody. Tohoto můžeme, dosáhnou přímo díky lokálnímu prostředí nebo díky již postaveným vodním stavbám jako jsou například přehrady, hráze, kanály a jiné.

Pokud se neoddelí proudy, může nastat situace, kdy se brakická voda bude dostávat do oběhu elektrárny. Brakická voda má nižší gradient slanosti než mořská voda. Nastával by pokles osmotického tlaku a zmenšení využitelné energie. [1]

3.2.2 Neustálý tok vstupních látek

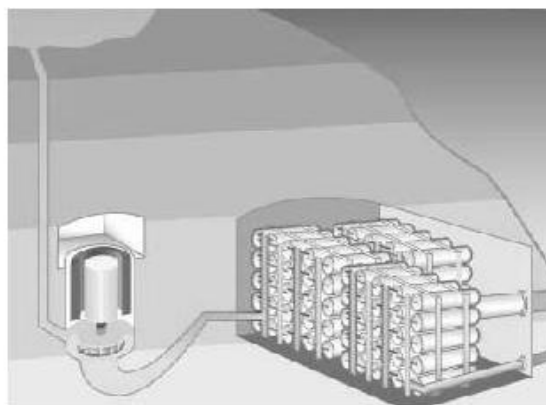
Nestálý tok vstupních látek je důležitý pro neustálou výrobu elektrické energie. Při dimenzování elektrárny je nezbytné provést řadu analýz týkající se říčního toku. Důležité je především se zaměřit na konstantní průtok vzhledem k ročnímu období. Z neustálého toku $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ čisté vody lze přibližně získat 1 MW energie a toto je důležitý předpoklad při koncipování kapacity budoucí elektrárny. [1]

3.3 Konstrukce elektrárny

V informačních produktech společnosti Statkraft se objevilo několik návrhů konstrukcí osmotické elektrárny. Na Obr. 5 vidíme typický návrh elektrárny umístěné na říčním toku kousek od jeho ústí do moře. Mořská voda by se napájela pomocí podzemního potrubí, odpadová brakická voda by byla vypouštěna do přirozené oblasti brakické vody. Cílem by bylo samozřejmě zachovat původní tok řeky. Další koncept používá myšlenku umístění osmotické elektrárny pod hladinu moře (6). Příchozí voda by byla tlaková díky vodnímu spádu. Umístění celé elektrárny 100 až 130 m pod hladinu moře by výrazně zvýšilo účinnost. Koncept spojuje klasickou vodní elektrárnu využívající gravitaci a osmotickou elektrárnu. Díky komplikovanému umístění stavby, i při využití přírodních prostor (například jeskyní pod úrovní moře) se výrazně zvyšuje ekonomická náročnost.[9]



Obr. 5: Elektrárna u ústí řeky do moře[9]



Obr. 6: Elektrárna pod úrovní moře[9]

3.4 Úprava vody

Úprava vody je důležitou součástí osmotické elektrárny. Membrány v PRO jednotkách jsou citlivé na poškození. Poškodit je mohou částice ve vodě, které ucpou póry v membráně. Ve vodách se nacházejí i mikroorganismy, které by mohly poškodit membrány a zkrátit jejich životnost.

Úprava probíhá hlavně mechanickou filtrací. V prototypu osmotické elektrárny se používá filtr s pórovitostí 50 μm . Tato oblast je velmi finančně náročná a perfektní kvalita sladké i slané vody je podmínkou pro úspěšný provoz tohoto zařízení. V případě mořské vody je nejvýhodnějším řešením snažit se o co nejmenší úpravy vody a zachování nízké ceny těchto zařízení, protože množství upravované mořské vody dosahuje obřích objemů.

Obecně je úprava vody pro osmotickou elektrárnu velmi nákladnou oblastí, proto by bylo vhodnější zdokonalit samotné parametry membrán. [1][11]

3.5 Membrány

Membránové jednotky a samotná membrána je základní částí osmotické elektrárny. Zatímco ostatní použité technologie jsou dlouho známé a vyvíjené, membrány jsou prakticky novinkou v alternativních zdrojích energie. V jiných oblastech jsou hojně využívány, ale v této oblasti je potřeba, aby membrána měla jiné důležité vlastnosti, než jaké mají dosud známé membrány.

3.5.1 Výkon membrán

Výkon membrány se obvykle udává v práci na jednotku plochy membrány – jak už jsem zmínil v části 2.5. Už od počátku 21. století se snaží společnosti zabývající se vývojem membrán vyvinout nový typ membrány, která by měla výkon alespoň 5 W m^{-2} . Tato hodnota byla už v prvních výzkumech v 90. letech 20. století nastavena jako zlomová hodnota, kdy se osmotická elektrárna stane finančně výhodnou.[4]

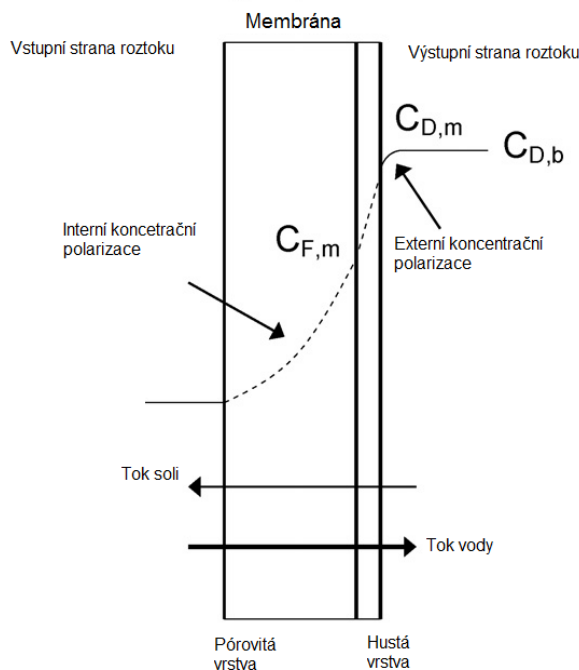
Kromě hledání co nejvyšší výkonnosti membrány je důležité vzít v úvahu i vyšší odolnost vůči hydrostatickému tlaku. Slaná voda je tlakována až na 13 barů, a proto musí membrána vydržet tyto operační hodnoty.

Jednou z největších překážek ve vývoji membrán je fenomén „concentration polarization“.

3.5.2 Concentration polarization (Koncentrační polarizace)

Tento fenomén objevil Loeb a spol., když si při pokusech v laboratorním měřítku všimli, že reálný výstupní výkon z membrány je menší než výkon teoretický. Tento fenomén je definován jako *akumulace nebo úbytek rozpouštěné látky blízko rozhraní jako výsledek vody*

prostupující polopropustnou membránou. Rozpouštěná látka je koncentrovaná na povrchu membrány na vstupní straně a rozpouštědla na druhé straně membrány. [8]



Obr. 7: Koncentrační polarizace

Existují dva druhy CP, a to externí a interní. Na obrázku vidíme externí concentration polariziton nastává během času (pro koncentrace C_1 a C_2) na vnější straně membrány. Koncentrace C_3 zobrazuje interní CP, která se tvoří na aktivní straně membrány. Jelikož žádné membrány nejsou kompletně polopropustné, existuje zde zpětný tok soli skrz membránu. Hromadění soli na vstupní straně membrány (strana sladké vody) způsobuje, že není celý proces řízen celkovou velikostí osmotického tlaku, ale rozdílem mezi takto zmenšenými koncentracemi. Z toho plyne úbytek výkonnosti membrány. [4]

Skutečný tok vody skrz membránu můžeme tedy vyjádřit rovnicí:

$$J_{act} = A \left(\frac{\pi_D \exp\left(-\frac{J}{k}\right) - \pi_F \exp\left(\frac{JS}{D}\right)}{1 + \frac{B}{J} \left[\exp\left(\frac{JS}{D}\right) - \exp\left(-\frac{J}{k}\right) \right]} - \Delta P \right) \quad (2.2)$$

J_{act} je skutečný tok vody skrz membránu, A je membránová konstanta, J je tok vypočítaný dle rovnice (1.3), π_F je osmotický tlak vstupního roztoku (sladké vody), π_D je osmotický tlak roztoku napájeného vstupním (mořská voda). B je koeficient propustnosti soli skrz aktivní vrstvu membrány k je součinitel přestupu hmoty. D vyjadřuje difuzní koeficient soli v membráně. S je odpor přestupu soli v podpůrné vrstvě membrány.

Tento výpočtový model se používá k výzkumu různých typů membrán. Základní parametry k výzkumu jsou konstanty A , B , i . Snižování parametru S (parametr podpůrné vrstvy membrány) má za důsledek omezení efektu ICP a tím zvětšení celkového průtoku. Parametr podpůrné vrstvy membrány je definován jako:

$$S = x \frac{\tau}{\varphi} \quad (2.3)$$

Kde φ vyjadřuje pórovitost, x tloušťku pórovité vrstvy membrány, τ je parametr zkroucení.[1][4][8]

3.5.3 Typy membrán

Rozeznáváme dva základní typy membrán:

1. Flat sheet membrane
2. Hollow fibre membrane

3.5.3.1 Flat sheet membrane

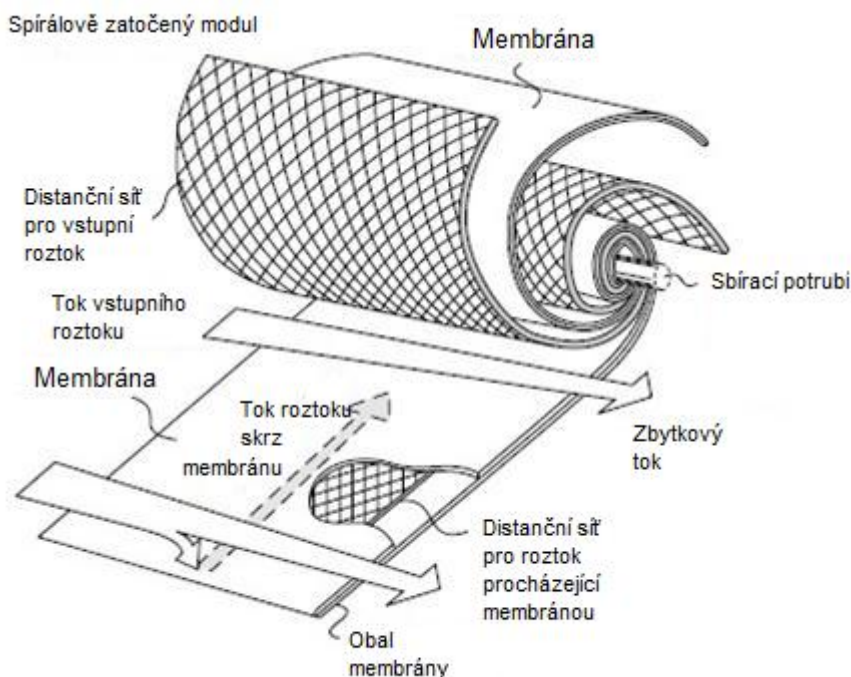
Tato skupina se rozděluje na thin film composite (TFC) membranes a asymetrické membrány.

Struktura TFC membrány se skládá z aktivní tenké vrstvy ze dvou monomerů (tloušťka této vrstvy se pohybuje okolo 1 mikronu) a z podpůrné vrstvy z netkaných textilií. Aktivní tenká vrstva poskytuje dostatečné zamezení prostupu soli, tím nízkou hodnotu B. Podpůrná vrstva se skládá s polymerů a definuje nám parametr S. Parametry membrán A a B jsou dnes běžně známé a používané při definování membrán v odsolovacích závodech, tyto závody využívají reverzní osmózy, jak jsem zmínil v části 2.4.2. Ovšem parametr S u těchto membrán je mnohem vyšší než 0,5 mm, což je cílová hodnota pro PRO membrány. Tenká podpora s velkou pórovitostí a nízkým parametrem zkroucení usnadní samotný průstup vody.

Asymetrické membrány jsou vyrobeny z acetových vláken (CA – Cellulose acetate). Původně byly navrhovány, průkopníkem v oblasti, Loebem okolo roku 1960. Zatímco TFC membrána se skládá z více vrstev, CA je vyráběna pouze jedním procesem.

Polymer CA se usadí na síť vytvořenou z netkaných materiálů. Následně je takto připravená sestava krátkodobě vystavena působení vzduchu a poté ponořena do lázně, která způsobí fázové přeměny polymeru. Toto utvoří jednu celistvou membránu s tenkou hustou povrchovou vrstvou a širší podpůrnou vrstvou. Obě tyto vrstvy jsou vyrobeny ze stejného polymeru.

Tyto TFC membrány jsou nejčastěji uspořádány do spirál, jak je uvedeno na následujícím obrázku: [4][18]



Obr. 8: Spirálové uspořádání TFC membrány [1]

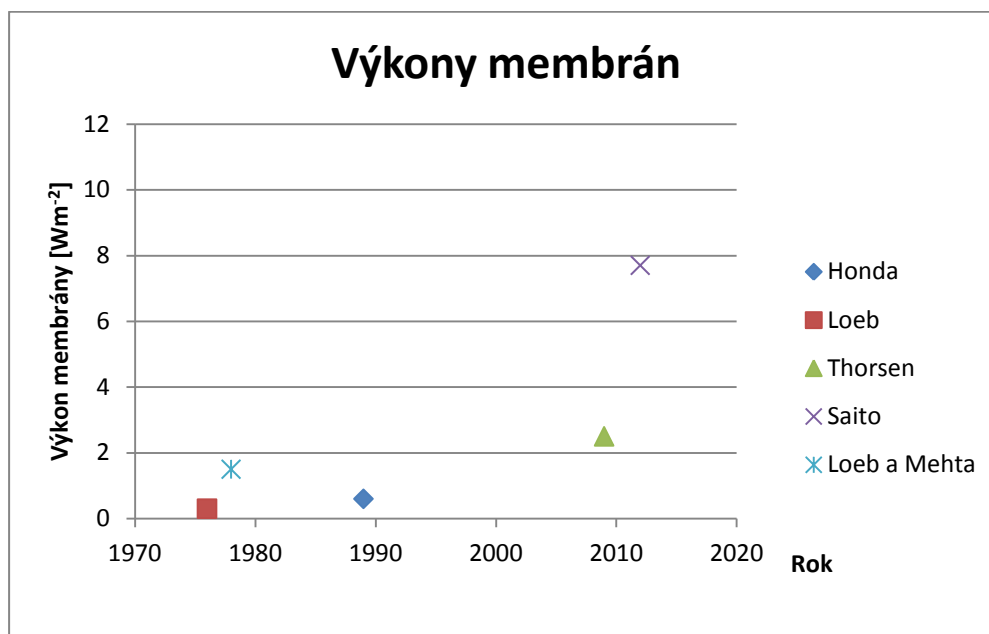
3.5.3.2 Hollow fibre membrane (HF)

Hollow fibre membrane, je další typ uspořádání membránového elementu. Membrána je tvořená upraveným CA nebo polyamidem. Membránový modul se skládá z malých trubic uspořádaných do kruhového obrazce. Tyto trubice jsou duté a mají průměr menší než 0,5 mm. Největší výhodou HF membrán je to, že umožňují uzavřít velkou plochu do malého objemového prostoru.

3.5.4 Porovnání výkonu membrán

V komerční sféře pro reverzní osmózy a procesy s ní spjaté nacházíme více typu membrán od různých společností. Bohužel většina z nich není využitelná pro PRO, která potřebuje větší odolnosti vůči hydraulickému tlaku, kterým musí být slaná voda natlakována.

Na následujícím grafu vidíme vypočtené výkony z vodních průtoků dosažené při laboratorních pokusech od objevení technologie v roce 1976. S osmotickým tlakem podobným rozdílu mezi sladkou a mořskou vodou bylo dosaženo výkonu až k $5,7 \text{ Wm}^{-2}$, za použití TFC membrány. Při použití celulózo-acetátové membrány bylo dosaženo výkonu $2,7 \text{ Wm}^{-2}$. Při použití schématu čistá voda a lák s 6% koncentrací chloridu sodného, bylo v experimentech dosaženo výkonu až $7,7 \text{ Wm}^{-2}$ za pomoci membrán z prototypu PRO vyrobeného z celulózo-acetátové z HF membrány. Nejvyšší laboratorně dosažená hodnota výkonu je $10,6 \text{ Wm}^{-2}$, při použití láku a upravené TFC – HF membrány.. [4]



Obr. 9: Graf dosažených výkonů

Dosažené výsledky od Loeba [12], Hondy [13] a Thorsena [14] značí výsledky dosažené s roztoky koncentrací podobnou mořské vodě, výsledky od Loeba s Mehtou [15] a Saita [16] jsou výsledky dosažené s roztoky koncentrací větší než mořská voda.[4]

3.6 Současný stav a následující vývoj

Získávání energie z osmózy je pořád v raném stádiu vývoje. Technologie je sice poměrně dlouho známá, ale od stavu, kdy by byla udržitelným finančně výhodným zdrojem, ji pořád zbývá dlouhá cesta. Největší překážkou zůstává membrána a především její cena a neúčinnost. V dnešní době se žádné společnosti vyrábějící membrány pro odsolovací procesy a jiné, nezabývají výrobou membrány specificky pro PRO procesy. V poslední době se ovšem zvyšují požadavky na čistou vodu, urychlují vývoj podobných typu membrán, jaké by se daly použít i v případě osmotických elektráren. V roce 2012 byla průměrná cena membrán okolo 5 €/m². Avšak studie předpokládají, že vývoj membrán posune cenu na 2 €/m². [1]

V současnosti společnost Statkraft pracuje s prototypem osmotické elektrárny umístěné na jihu Norska ve městě Tofte. Tato elektrárna má výkon mezi 2 – 4 kW a výkon membrán 3,0 Wm⁻². Předpokládány vývoj počítá kromě vylepšování vlastností membrán, taky se zvětšováním pilotních projektů do elektráren plné velikosti. [8]

STATKRAFT(PRO)	2014?	2017	?
Výkon	2 MW	25 MW	?
Fáze	Pilotní	Demo	Finální
Předpokládaný tok	2 m ³ /s	25 m ³ /s	?
Výkon membrán	3,5 W/m ²	5,0 W/m ²	?
Účinnost systému	60 %	80 %	?

Tabulka 1: Potenciál PRO elektráren dle STATKRAFT[1]

3.7 Globální potenciál

Přibližně 0,7 – 0,7 kWh (2,5 – 2,7 MJ) se uvolní, když 1 m³ sladké vody vteče do moře.

Pokud vezmeme v potaz průměrný tok všech světových řek do moří a oceánů, můžeme si to představit jako by všechny tyto řeky byly zakončeny vodopádem o výšce 225 metrů. Globální potenciál je stanoven 1650 TWh za rok.

To odpovídá zhruba poloviny současné roční energie vytvořené ve vodních elektrárnách.

Energie, která by se potenciálně dala získat z největších vodních toků světa je uvedena v Tabulka 2. Při výpočtu bylo použito předpokladu, že se využije 10% toku řek, průměrná koncentrace soli v mořské vodě byla stanovena na 3 %. Účinnost celého PRO systému byla zvolena na 40 %.[4]

Zdroj sladké vody	Průměrný tok sladké vody (m^3s^{-1})	Energie (MW)
Svět	$1,2 \cdot 10^6$	124800
Amazonka, Brazílie	$2 \cdot 10^5$	20800
La Plata-Paraná, Argentina	$8 \cdot 10^4$	8320
Kongo, Kongo – Angola	$5,7 \cdot 10^4$	5930
Jang-c'ťiang, Čína	$2,2 \cdot 10^4$	2290
Ganga, Bangladéš	$2 \cdot 10^4$	2080
Mississippi, USA	$1,8 \cdot 10^4$	1870

Tabulka 2: Teoretická energie získatelná osmózou z některých hlavních řek světa.[4]

3.8 Dopad na životní prostředí

Míšení sladké a slané vody je přirozený děj, probíhá neustále. Osmotické elektrárny jsou plánovány tak, aby využily energetický potenciál v tomto ději a zároveň co nejméně zasáhly do prostředí ústí řek do moří. Z historického vývoje naší civilizace, většina řek se vlévá do moře v blízkosti nějakého města či průmyslové zástavby. Tento předpoklad poskytuje možnost ke stavbě osmotické elektrárny, aniž by byla nutná stavba uprostřed zatím nezastavěné přírody. Další možností, jak již bylo zmíněno je umístění stavby částečně pod povrch, tímto by se dopad na životní prostředí ještě zmínil. Byla provedená také analýza na dopad vypouštění brakické vody, ale nebyly nalezeny žádné významnější překážky. Osmotická elektrárna by tedy byla podobně čistým zdrojem energie jako větrná energie.[19]

4. Zjednodušený výpočet osmotické elektrárny

V této části se budu věnovat návrhu osmotické elektrárny pro zvolenou lokaci. Výpočet bude zjednodušen. Při návrhu osmotické elektrárny bude zkoumáno, zda může být finančně výhodná. Předpoklad bude v použití technologie dle prognóz dostupné v blízké budoucnosti. Základní konstrukce výpočtu vychází z práce Kleiterpa.[1]

4.1 Volba lokace

Pro tento výpočet bohužel není možné zvolit jako vhodnou lokaci naši zemi. Po zhodnocení několika lokací jsem zamítl na příklad Polsko z důvodu velmi nízké slanosti Baltského moře a zvolil jsem Velkou Británii.

4.1.1 Přehled britské energetiky

Velká Británie je stejně jako mnoho ostatních států, závislá na energii vyráběné v tepelných elektrárnách. Hlavním palivem v Británii je zemní plyn, díky nalezištím těchto fosilních paliv v Severním moři. Zemní plyn zaujímá 42 % ve výrobě elektřiny. Druhým nejvýznamnějším palivem pro elektrárny je uhlí, které zabírá 29 % trhu. Nukleární energie má podíl 16 % a v rámci snižování emisí skleníkových plynů, by tato hodnota se mohla do budoucnosti zvětšovat. Británie se připravuje na velkou dekarbonizaci, kdy si dala za plán do roku 2020 snížit emise skleníkových plynů na polovinu a do roku 2050 ji snížit o 80%. Proto dnes 7% výrobou energie zaujímají obnovitelné zdroje (jmenovitě bioplyny a odpady 3,5 %, větrná energie 2,7 % a ostatní 1 %).[20]

4.1.2 Hydrologie Velké Británie

Vodstvo se ve Velké Británii se skládá především z menších řek. Nejdelší řekou je Temže, která pramení na jihu střední Anglie, teče jihovýchodně a vlévá se do Severního moře. Druhou nejdelší řekou je ve středním Walesu pramenící Severn tekoucí jižně. Severn se vlévá do Bristolského zálivu na jihu Anglie. I když jsou tyto dvě řeky nejdelší, největší průměrný průtok v ústí má řeka Tay ve Skotsku.[24] Soutok tří velkých řek do řeky Humber, je také jedno z potencionálních míst.

Tyto čtyři lokace jsem vybral jako možné místo pro stavbu osmotické elektrárny, další místa by se dala určitě také najít, ale toto by mohlo být předmětem další studie. Proto dále budu pracovat pouze s těmito lokacemi. Místa jsou znázorněna na následující mapě a to postupně:

1. Ústí řeky Temže
2. Ústí řeky Severn
3. Ústí řeky Tay
4. Ústí řeky Humber

4.1.3 Podmínky pro vhodnou lokaci

První a nejdůležitější podmínkou je tok vstupní čisté vody, pokud budeme vycházet z předpokladu zmíněného v odstavci 3.2.2, že z $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ čisté vody lze získat přibližně 1 MW energie. Dalšími faktory jsou slanost moře, možnost stavby infrastruktury, přirozené oddělení proudů.[1] Následuje porovnání těchto lokací:

	1-Temže	2-Severn	3-Tay	4-Humber
Průměrný průtok čisté vody[22]	$65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$170 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Slanost moře[21]	35ppt	35ppt	35ppt	35ppt
Možnost stavby infrastruktury	Ano	Ano	Ano	Ano
Přirozené oddělení proudů	Ne	Ne	Ne	Částečné

Tabulka 3: Porovnání potenciálních lokací



Obr. 10: Lokace vybrané ve Velké Británii

Bylo počítáno se střední slaností Severního moře, většina britských řek ústí v takzvaném estuáru. Estuár je typ ústí, které má nálevkovitý tvar a mísí se zde proudy sladké a slané vody. Oblast je ovlivňována mořskými jevy, jako jsou vlny a příliv a odliv.[25]

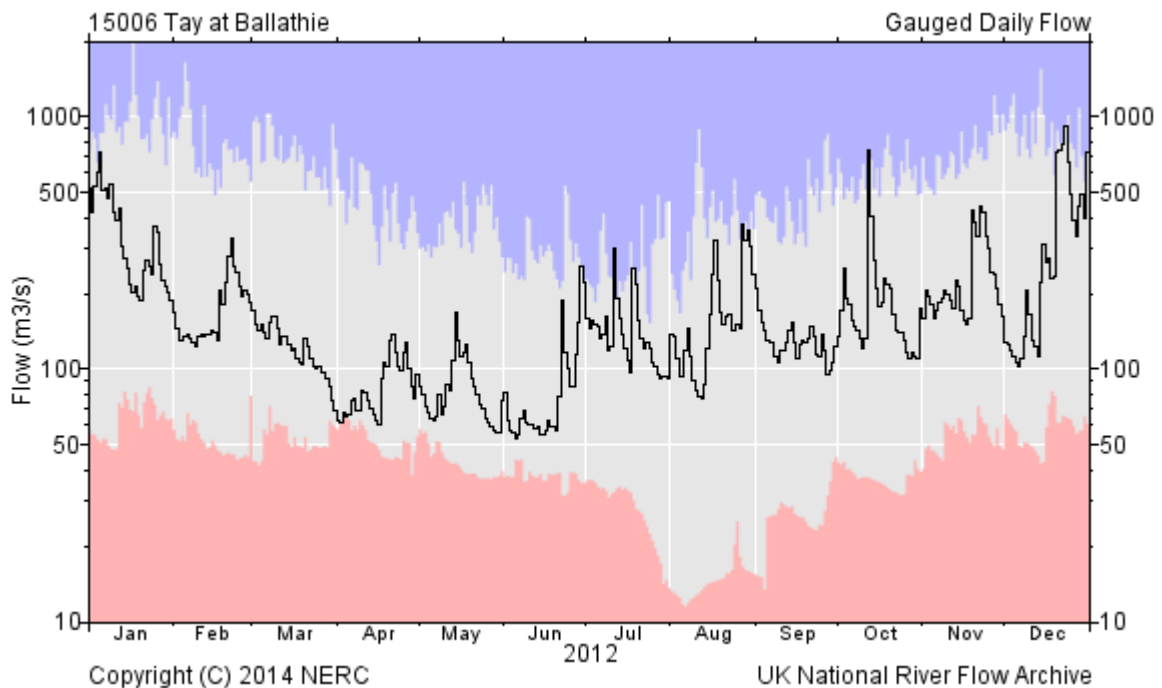
Ústí Temže je velmi široké a samotný stav vody je zde ovlivňován přílivem a odlivem, proto by zde bylo těžší najít vhodné místo k odběru slané vody o konstantní slanosti. U řeky Severn, je tento problém obdobný. Řeka Humber poskytuje poměrně velké množství průtoku, ovšem díky rozlehlému ústí lze pozorovat pronikání soli do oblasti až 70 km vzdálené od pobřeží.[23]. Proto vzhledem k situaci volím ústí řeky Tay jako potenciální lokaci pro stavbu.

4.2 Řeka Tay

Řeka Tay pramení ve Skotsku na svazích Ben Nui je šestá nejdelší řeka ve Spojeném království a nejdelší řeka Skotska. Celková délka řeky od pramene k ústí u města Dundee je 193 km. Oblast odplavována řekou má rozlohu $6,200 \text{ km}^2$. Ačkoli není nejdelší řeka, dosahuje průtoku jak Temže i Severn dohromady. [26]

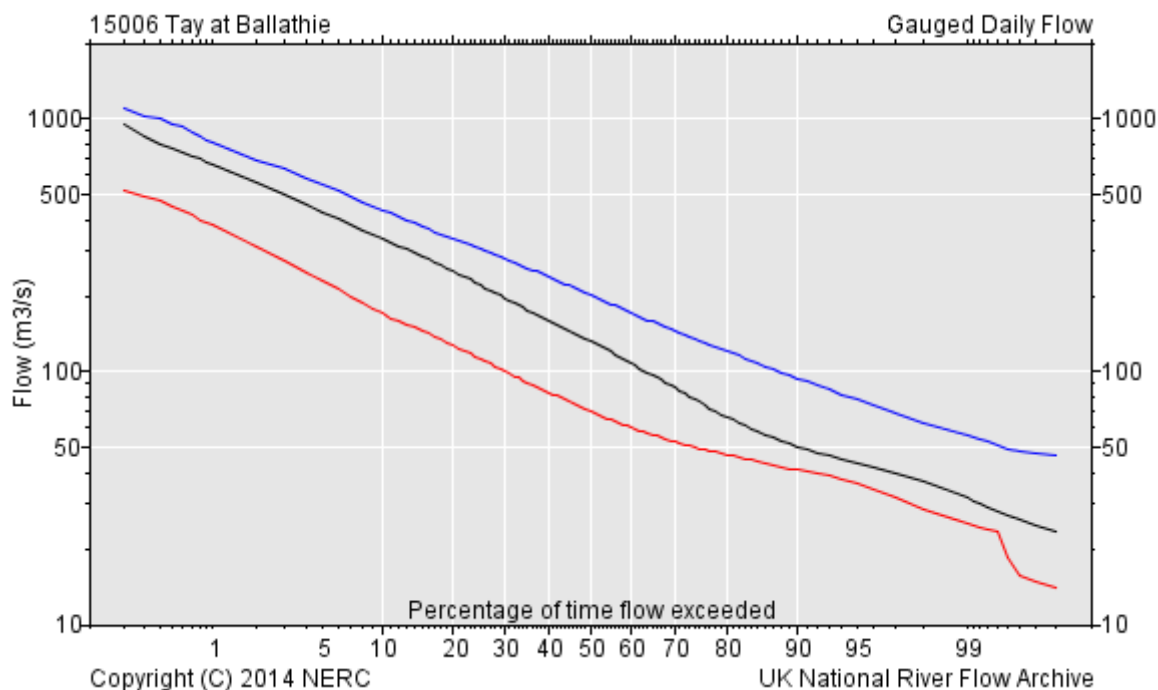
4.2.1 Dostupnost čerstvé vody

V následujícím grafu vidíme průtok během roku 2012, kdy modře jsou zvýrazněné nejvyšší dosažené hodnoty za dosavadní měření (od roku 1972) a červeně nejnižší hodnoty.



Obr. 11: Průtok během roku 2012[22]

Určení nejnižšího konstantního průtoku je důležité pro návrh kapacity elektrárny. Jelikož řeka Tay mění svůj průtok v závislosti na ročním období. V zimních měsících může průtok stoupat až k $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ zatímco v době delšího sucha může průtok spadnout až pod $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. V případě tak nízkého průtoku by následovala možnost pozastavit proces vytváření energie. Černá linka vyjadřuje průměrný roční průtok, červená pro období červen až září a modrá pro zimní období prosinec až březen.



Obr. 12: Očekávaný průtok během roku v procentech času[22]

Projektovaný vstupní průtok bude tedy $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, která je zaručená 75% času roku. Pokud ovšem nebude dosahovat takovýchto hodnot, připadají v úvahu tři varianty.

1. Tok řecištěm bude větší než projektovaný vstupní průtok, poté bude odebírán tento projektovaný průtok
2. Tok řecištěm bude menší než projektovaný vstupní průtok, poté bude odebírán tento menší průtok
3. Tok řecištěm se bude blížit limitní hodnotě toku, poté bude přívod vody uzavřen a výroba energie bude pozastavena.

4.2.2 Salinita

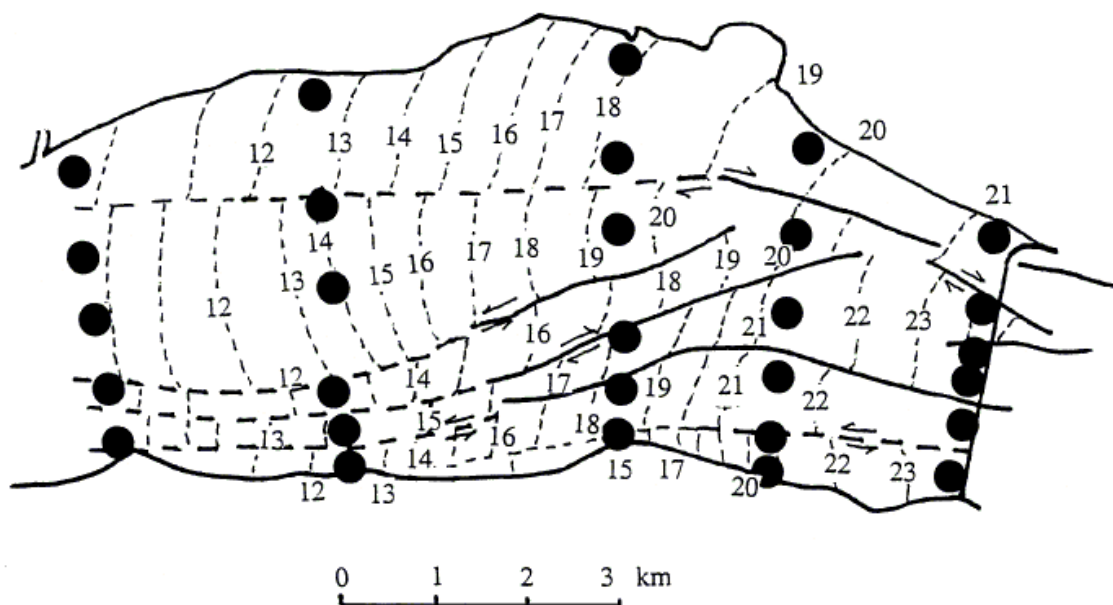
Salinita je dalším důležitým faktorem ovlivňující výkon elektrárny. V našem případě je poměrně komplikovaný a to z důvodů typu ústí řeky Tay. Ta totiž ústí do estuáru, který je poměrně rozlehlý a proto je ovlivňován přílivem a odlivem, který v podstatě posunuje hranici rozdílu salinity. První známky salinity se objevují už v městě Perth 35 km vzdáleném od pobřeží moře. Je důležité pro přesné určení polohy projektované elektrárny, přesně rozvrhnout rozdělení salinity v tomto estuáru. Můžeme předpokládat poměrně nákladný transport vstupních surovin na delší vzdálenosti, hlavně mořské vody.[27]

V 70. a 80. letech 20. století byly provedeny výzkumy salinity v estuáru řeky Tay. Salinita je závislá na přítoku čerstvé vody, pokud bude nízký přítok, například v letních měsících, pak bude slaná či brakická voda, díky přílivu, i v oblastech velmi vzdálených od pobřeží moře. Pokud na druhou stranu bude přítok dosahovat až $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pak se slaná a brakická voda posunou mnohem blíž k pobřeží.[27]



Obr. 13: Mapa ústí řeky Tay

Na Obr. 13 vidíme mapu ústí řeky Tay. Pro ideální odběr slané vody by bylo vhodné umístit až mimo oblast ovlivněnou tokem řeky, toto by zajistilo přísun mořské vody s konstantní salinitou. Ta se pohybuje v rozmezí 32 až 34 ppt. Hlavní proud řeky teče umístěný blíže k pravému břehu, proto nad potenciálním umístěním odbírací stanice čerstvé vody musíme vzít v úvahu změnu slanosti vzhledem ke slapovým jevům i ke změně toku. Na následujícím grafu jsou rozkresleny vrstvy slanosti získané při měření. Ovšem tato data byla získána pouze při měření jednoho dne. Pro přesné určení salinity a její proměnlivosti v dané lokalitě by byl potřeba další výzkum. [27]



Obr. 14: Salinita v estuáru při měření v roce 1986[27]

Hodnoty představují slanost v ppt. V dalším výpočtu přicházejí v úvahu dvě možnosti:

1. Delší dopravování čisté vody do elektrárny
2. Pracování s menším rozptylem salinit

V dalším zpracování proto volím místo nedaleko města Newport on Tay. Pro odběr sladké vody bude využita lokalita nedaleko pravého břehu řeky Tay vzdálené zhruba 5 km. Oblast je vyznačená na mapce:

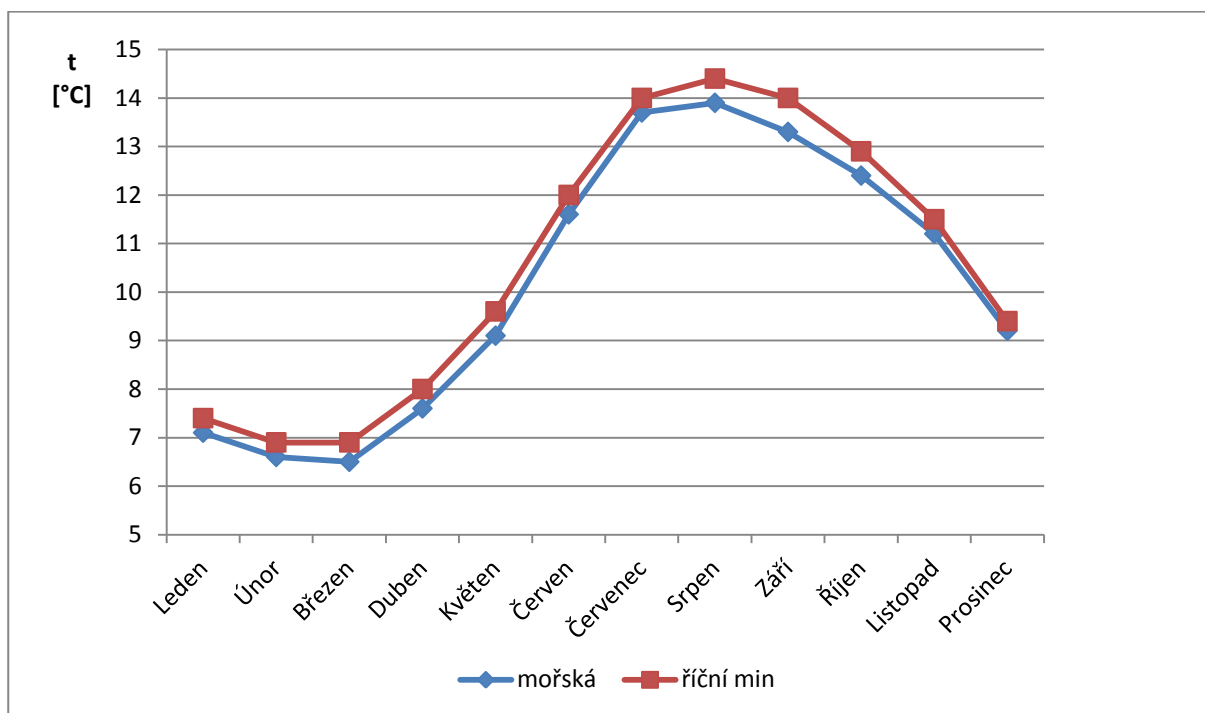


Obr. 15: Projektované umístění elektrárny

Tyrkysová šipka značí směr vstupu říční vody, modrá šipka směr vstupu mořské vody a zelená výstup brakické vody. Pro určení salinity říční vody v různém období roku by byla potřeba kompletní studie, proto v této situaci budu používat hrubý odhad. Slanost říční vody v místě odběru bude tedy definovaná od 0,5 do 13 ppt.

4.2.3 Teplota

Roční průměrné teploty pro lokalitu jsou zobrazeny v následujícím grafu:



Obr. 16: Graf průběhu průměrných teplot během roku

4.2.4 Teoretický osmotický tlak

Při výpočtu hodnoty teoretického osmotického tlaku, použijeme data o slanosti a teplotě a dosadíme je van't Hoffovy rovnice. Poté odečteme osmotický tlak říční vody od osmotického tlaku mořské vody. Výsledný teoretický osmotický tlak je vyjádřen v následující tabulce:

	Teplota [°C]		Teplota [K]		Salinita [g/l]			Osmotický tlak [bar/m ³]	
	mořská	říční	mořská	říční	mořská	říční min	říční max	maximální	minimální
Leden	7,1	7,4	280,25	280,55	34	0,5	13	26,71	16,73
Únor	6,6	6,9	279,75	280,05	34	0,5	13	26,66	16,70
Březen	6,5	6,9	279,65	280,05	34	0,5	13	26,66	16,69
Duben	7,6	8	280,75	281,15	34	0,5	13	26,76	16,76
Květen	9,1	9,6	282,25	282,75	34	0,5	13	26,90	16,85
Červen	11,6	12	284,75	285,15	34	0,5	13	27,14	17,00
Červenec	13,7	14	286,85	287,15	34	0,5	13	27,34	17,13
Srpen	13,9	14,4	287,05	287,55	34	0,5	13	27,36	17,13
Září	13,3	14	286,45	287,15	34	0,5	13	27,30	17,09
Říjen	12,4	12,9	285,55	286,05	34	0,5	13	27,22	17,04
Listopad	11,2	11,5	284,35	284,65	34	0,5	13	27,10	16,98
Prosinec	9,2	9,4	282,35	282,55	34	0,5	13	26,91	16,86
Průměr	10,18	10,58	283,33	283,73	34	0,5	13	27,01	16,91

Tabulka 4: Tabulka k výpočtu teoretického osmotického tlaku

Uvedené teploty dle [33].

4.2.5 Praktický rozdíl v osmotickém tlaku

V části 2.5 bylo odvozeno, že nejvyššího výkonu dosáhneme při použití poloviny z rozdílu osmotických tlaků vypočtených v předchozí části.

	Praktický osm. tlak [bar/m ³]	
	maximální	minimální
Leden	13,36	8,37
Únor	13,33	8,35
Březen	13,33	8,35
Duben	13,38	8,38
Květen	13,45	8,42
Červen	13,57	8,50
Červenec	13,67	8,56
Srpen	13,68	8,57
Září	13,65	8,54
Říjen	13,61	8,52
Listopad	13,55	8,49
Prosinec	13,46	8,43
Průměr	13,50	8,46

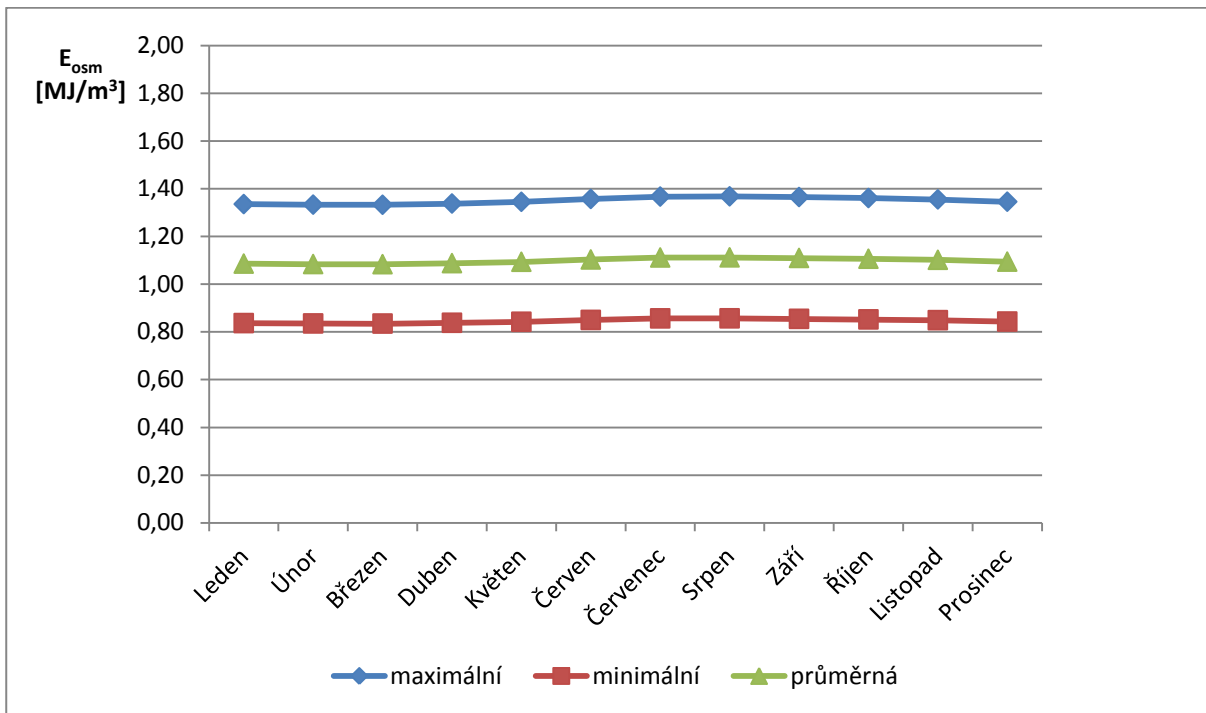
Tabulka 5: Praktický rozdíl osmotického tlaku

4.2.6 Praktická osmotická energie

Pro zjištění množství energie získatelné z 1 m³s⁻¹ sladké vody použijeme rovnici:

$$E_{osm} = \Delta\pi_{osm} \cdot 10^{-1} \quad (3.1)$$

Po dosazení a vypočtení vyjde následující graf osmotické energie v závislosti na datu.



Obr. 17: Praktická osmotická energie

Praktická osmotická energie se poté bude pohybovat mezi hodnotami $0,8MJ \cdot m^{-3}$ až $1,35MJ \cdot m^{-3}$ a průměrná hodnota bude $1,1MJ \cdot m^{-3}$, což je více než předpoklad $1MJ \cdot m^{-3}$. Celé řešení podléhá nepřesnému určení salinity říční vody, pro přesnější řešení by byla potřeba analýza závislosti říčního toku na salinitě v estuáru. Pro další výpočty bude počítáno s průměrnou hodnotou:

$$E_{osm} = \frac{E_{osmmax} + E_{osmmin}}{2} = 1,1MJ \cdot m^{-3} \quad (3.2)$$

Pro upřesnění hodnoty by bylo nutné zvážit závislost salinity na toku řeky a slapových jevech.

4.3 Průtoky

4.3.1 Průtok říční vody

Potřebný průtok čisté vody lze vypočítat z rovnice (3.1). Využijeme-li předpokladu, že minimální průtok, který jsme definovali jako projektovaný průtok je $80 m^3 s^{-1}$. Poté dle rovnice dostáváme dvě hodnoty pro výkon elektrárny:

$$P_{ele} = Q_F \cdot E_{osm} = 80m^3 \cdot s^{-1} \cdot 1,1MJ \cdot m^{-3} = 88MW \quad (3.3)$$

Ve skutečnosti se ovšem pouze 90 % čisté vody dostane skrz membránu. Zbylých 10 % se nevyužije a vrátí se zpět. Lze předpokládat, že při nižších průtocích v letních měsících bude přijímaná voda s vyšší salinitou, tudíž elektrárna bude mít menší výkon.

Pro další výpočet počítáme s výkonem $P_{ele} = 90MW$.

$$Q_{fresh;in} = 0,9 \cdot \frac{P_{ele}}{E_{osm}} = 0,9 \cdot \frac{90MW}{1,1MJ \cdot m^{-3}} = 74m^3 s^{-1} \quad (3.4)$$

Toto vyjadřuje čistý průtok získávaný z řeky. Dále je potřeba zvážit ztráty při prostupu membránou, tedy 10 % z celkového toku čisté vody elektrárnou.

$$Q_{fresh;loss} = 0,1 \cdot \frac{P_{ele}}{E_{osmmin}} = 0,1 \cdot \frac{90MW}{1,1MJ \cdot m^{-3}} = 8m^3s^{-1} \quad (3.5)$$

Součet těchto hodnot vyjadřuje celkový tok čisté vody:

$$Q_{fresh} = Q_{fresh;loss} + Q_{fresh;in} = 74m^3s^{-1} + 8m^3s^{-1} = 82m^3s^{-1} \quad (3.6)$$

Tento průtok je tedy maximální, odebíraný z řeky při nejvyšší salinitě, abychom dosáhli výkonu 90 MW. Celý systém bude tedy konstruován na tento průtok.

4.3.2 Průtok mořské vody

Průtok slané vody do systému elektrárny by měl být dvakrát větší než průtok říční vody. Důvodem je použití části slané vody v tlakovém výměníku. Proto tedy:

$$Q_{salt} = 2 \cdot Q_{fresh} = 2 \cdot 82m^3s^{-1} = 164m^3s^{-1} \quad (3.7)$$

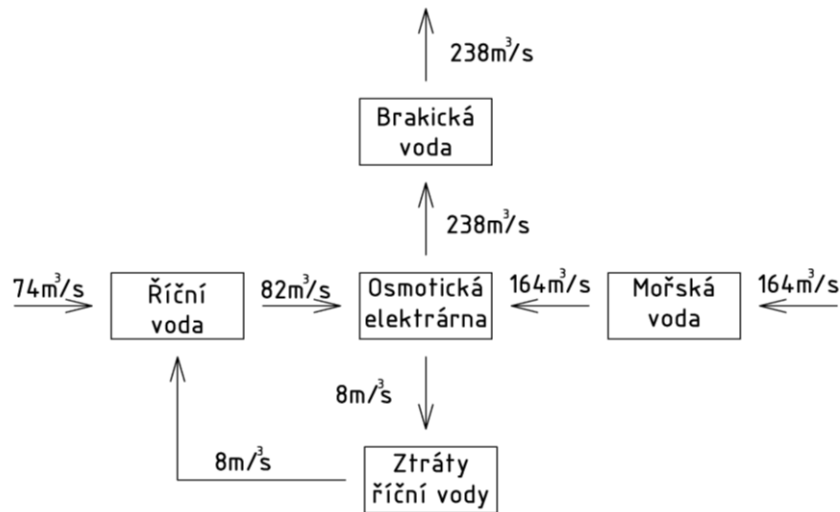
Žádné ztráty v případě mořské vody na rozdíl od říční nenastanou. Slaná voda se totiž stane brakickou díky prostoupené sladké vodě skrz membránu.

4.3.3 Průtok brakické vody

Průtok brakické vody systémem můžeme stanovit jako součet říční, která projde přes membránu a mořské vody.

$$Q_{Bra} = Q_{salt} + Q_{freshin} = 164m^3s^{-1} + 74m^3s^{-1} = 238m^3s^{-1} \quad (3.8)$$

Celý systém je zobrazen na následujícím obrázku. Na tyto průtoky bude konstruován systém osmotické elektrárny.



Obr. 18: Diagram toků elektrárnou

4.4 Produkce energie

Produkcí energie lze vyjádřit rovnicí:

$$E_{prod} = E_{osm} \cdot Q_{fresh} \cdot t_{hod/rok} \quad (3.9)$$

Z této rovnice dostávám hrubou produkci energie $713GWh/rok$. Avšak vstupní tok $74 m^3 s^{-1}$ není dostupný během celého roku, ale dle Obr. 12 jen 80 % času roku. Po dosazení do rovnice, získáváme průměrnou hodnotu produkované energie $570GWh/rok$.

4.5 Vstupní a výstupní systémy

První stupněm elektrárny jsou vstupní a výstupní systémy. Tyto systémy poskytují neustálý tok říční a mořské vody. Ve vybrané lokaci se ovšem pohybují ve velmi velké vzdálenosti od místa elektrárny. Toto bude zvaženo v následujícím rozboru.

Vstupní a výstupní systémy se skládají ze vstupu a kanálu, kterým se voda transportuje do elektrárny. Poslední fází elektrárny je výstup brakické vody do estuáru řeky Tay. Jelikož jsou vstupní a výstupní systém podobné, budou zvažovány jako stejné.

Vstupní a výstupní systémy mohou být konstruovány jako otevřené (kanály) či uzavřené (tunely, potrubí). Vzhledem k poloze je vhodnější v této lokalitě zvolit uzavřené potrubí. Hlavní hnací silou přenosu vody v tomto typu je rozdíl hladin na obou stranách potrubí. Toto zajistí tok vody mezi stranou s vyšší hladinou na stranu s nižší hladinou. Ztráty energie během toku jsou způsobeny délkovými ztrátami a také lokálními ztrátami, které způsobují náhlé změny směru či změny ve tvaru průřezu. Celou tuto situaci můžeme vyjádřit za pomoci Bernoulliho rovnice.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + h_1 \cdot g = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + h_2 \cdot g + Y_z \quad (3.10)$$

Z Bernoulliho rovnice vyjádříme celkovou tlakovou ztrátu, tato ztráta je způsobená rychlostí proudění, délkovými ztrátami a lokálními ztrátami, kterou vyjádříme do následující rovnice:

$$\Delta h = \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \cdot \left(1 + \lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum \xi \right) \quad (3.11)$$

V této rovnici Q zastupuje průtok elektrárnou, D střední průměr potrubí, L délku potrubí, λ vyjadřuje délkový ztrátový součinitel, $\sum \xi$ je součet koeficientů místních ztrát. Tento rozdíl hladin nám určuje výšku, kterou je třeba dorovnat dalším čerpáním. Toto čerpání snižuje produkci energie, proto je potřeba zvážit všechny části projektu, tak aby tato ztráta byla co nejmenší. Můžeme proto zvážit:

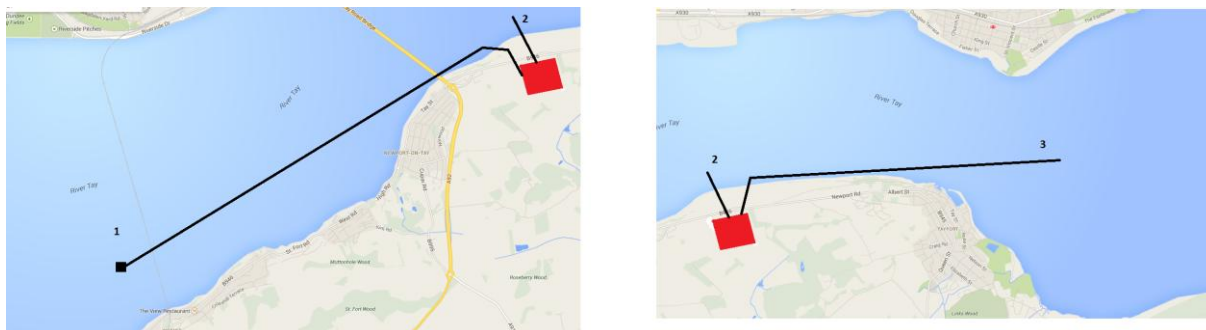
- Umístění odběrných stanic
- Základní design celého systému
- Rozměry jednotlivých částí systému

4.5.1 Typy odběrných stanic

Typ odběrné stanice záleží na lokálních podmínkách. Vodu můžeme odebírat z pobřežní stanice, ze stanice umístěné na dně nebo ponořené odběrné stanice. V lokaci u města Dundee se typ pobřežního odběru téměř jistě nedal použít. Je zde velký rozdíl v hladinách mezi přílivem a odlivem, a na pobřeží se nachází rezervace, která by mohla být tímto odběrným místem ovlivněna (například erozí). Pro tuto lokaci tedy bude navrhováno s ponořenou odběrnou stanicí.

4.5.2 Umístění odběrných stanic

Umístění odběrných stanic má velký vliv na celkovou tlakovou ztrátu. Odběr sladké vody bude realizován v oblasti vzdálené asi 4,5 km od budovy elektrárny. Potrubí povede rovnoběžně s pobřežím a poté zahne o 90° k souběhu všech tří kanálů. Slaná voda bude odebírána ze Severního moře, z místa vzdáleného asi 5,5 km od elektrárny, zde by mělo být nejmenší ovlivnění vody říční tokem a tím pádem zachována konstantní salinita. Potrubí opět povede rovnoběžně s pobřežím a nakonec zahne o 90° k souběhu všech tří kanálů. Výpusť brakické vody povede přímo z elektrárny do estuáru o celkové délce zhruba 350 m.



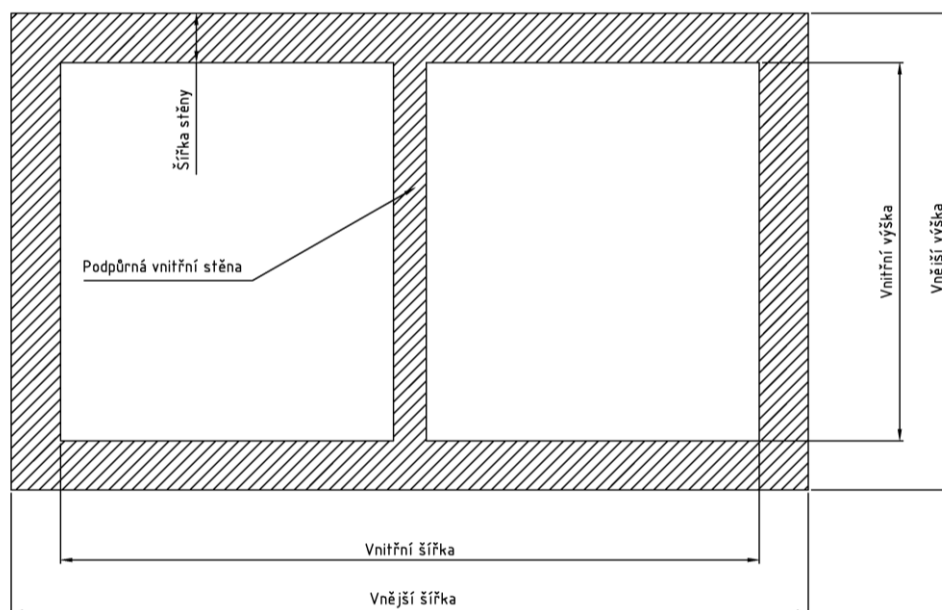
Obr. 19: Umístění vstupních a výstupních systému

4.5.3 Konstrukce vstupních a výstupních systému

Základní návrh konstrukce odběrných stanic a kanálů je převzata z [1]. Použití otevřeného kanálu by byla možnost u vypouštění brakické vody.

V ostatních případech je zvažována možnost odběru pomocí vstupních věží a podzemního kanálu, který má čtvercový průřez. Samotný tvar průřezu nemá tak velký vliv na totální tlakovou ztrátu. Mnohem větší vliv má typ použitého materiálu. Každý materiál má jinou drsnost, která ovlivňuje tok vody. Rozhodnutí jaký typ materiálu bude vhodný, záleží na jednotkové ceně za materiál. Nejvhodnější materiál by byl beton. Při porovnání s ocelí či plastem, který ovšem má v tomto případě omezené použití, neboť by mohly nastat problémy při tak velkých projektovaných průtocích.[1]

Odbírací věž má kruhový tvar, s otvory pro omezení vstupní rychlosti kapaliny a jejich případné zavření za účelem údržby. Návrh konstrukce věže je velmi podobný jako dnes používané věže v odsolovacích závodech. Z této věže vede tunel o obdélníkovém průřezu pro transport vody. Na konci tohoto tunelu se nachází čerpací jímka.



Obr. 20: Řez příčným průřezem potrubí

4.5.3.1 Vtoková rychlost

Vtoková rychlost má velký vliv na design vtokové soustavy. Jestliže použijeme větší vtokovou rychlost, můžeme použít menších rozměrů potrubí. Ovšem vysoká vtoková rychlost má negativní vliv na lodní dopravu a místní ekologii. Obzvláště ryby mají problémy a mohou být nasáty do systému. Pro vtokovou rychlost platí omezení, že by nemělo přesáhnout 0,3 m/s. Toto omezení velmi sníží počet nasátých ryb do systému.[28]

4.5.3.2 Cena za jednotku

Cena za jeden metr potrubí je stanovena na 400£ (500 €). Údaje vycházejí z roční zprávy o cenách za stavby civilní infrastruktury v Británii. Hodnoty jsou pouze orientační. Náklady na stavbu věží jsou ve skutečnosti větší, ale nebudou zhodnoceny, protože potrubí, díky své délce, bude převládající výdaj.

4.5.3.3 Rozměry

Rozměry systémů mají největší vliv na totální tlakovou ztrátu. Z rovnice (3.11) je patrné, že při dvojnásobném zvětšení průměru se zmenší totální tlaková ztráta šestnáctkrát. Ovšem cena v tomto případě vzroste. Pro analýzu rozměrů je třeba zjistit lokální ztráty a délkové ztráty:

Vstupní systém říční vody:

Celková délka potrubí je 4500 metrů. Potrubí se skládá ze dvou oblouků o 45°. Lokální ztráta v těchto obloucích je rovna 0,48. Další místní ztráty se nacházejí u vstupu a výstupu do potrubí. Pokud považujeme vstup do potrubí za pozvolné rozšíření průřezu, ztrátový součinitel je roven 0,15. Výstup do čerpací jímky je považován za náhle rozšíření potrubí do nádrže, pro tuto situaci je ztrátový součinitel roven 0,5. Suma všech ztrátových součinitelů je rovna 1,13.

Vstupní systém mořské vody:

Celková délka potrubí je 5500 metrů. Potrubí se skládá z jednoho oblouku o 45°. Součinitel místní ztráty je roven 0,24. Vstup a výstup potrubí je obdobný jako u systému říční vody. Celkový součinitel místních ztrát je roven 0,89.

Výstupní systém brakické vody:

Celková délka potrubí je 350 metrů. Na trase se nenacházejí žádné oblouky. Celkové místní ztráty se rovnají 0,65.

Analýza ekvivalentních průměrů, kdy tlaková ztráta nepřesáhne 1 metr v rozdílu hladin, je dána v tabulce. Poté je potřeba zjistit od ekvivalentního průměru v kruhovém průřezu, obdélníkový rozměr potrubí. Jelikož výška potrubí se nemůže zvětšovat do nekonečna, je brána maximální výška 3 metry. Tloušťku stěn by bylo potřeba počítat potrubí s kontrolou na vztlak, pro tento případ byla zvolena na 0,55 metrů pro říční a brakickou vodu a 0,65 metrů pro mořskou vodu. Pro delší šířky stěn musí být bráno v úvahu umístění podpůrných stěn.

	Říční voda	Mořská voda	Brakická voda
Průtok [m ³ /s]	88	164	238
Délka [m]	4500	5500	350
Odpovídající průměr [m]	10,5	14,8	11,2
Odpovídající vnitřní obsah [m ²]	86,59	172,03	98,52
Šířka stěn [m]	0,55	0,65	0,55
Počet podpůrných stěn	1	1	1
Odpovídající vnější obsah [m ²]	122	252	132

Tabulka 6: Analýza rozměrů potrubí

Tlakové ztráty jsou ovšem ovlivněné nadmořskou výškou a změnou výšky hladin. Tyto údaje byly ve výpočtu ignorovány z důvodů složitější potřebné analýzy. Dalším faktorem omezujícím možnosti této analýzy je nedostatečný počet veřejně přístupných dat o hloubkách v této oblasti. [29]

4.5.4 Celkové náklady

Celkové náklady za vstupní a výstupní systémy můžeme zjistit dle následujících vzorců.

$$C = A \cdot L \cdot C_{\epsilon/m^3} \quad (3.12)$$

Kde C jsou celkové náklady, A je vnější obsah potrubí v průřezu a L je délka potrubí. C_{ϵ/m^3} je jednotková cena za metr krychlový stanovená v odstavci 4.5.3.2. Po vypočtení získáváme tyto hodnoty:

- Cena za vstupní systém sladké vody: 275 000 000 €
- Cena za vstupní systém mořské vody: 693 000 000 €
- Cena za vstupní systém sladké vody: 24 000 000 €

Celkové náklady na stavbu vstupních a výstupních systémů by se pohybovaly okolo 1 000 000 000 €. Od skutečné situace se tato cena může lišit díky ústupkům, které byly v této bakalářské práci provedeny, přesto nám dává jistý přehled a hodnotě této části stavby.

4.6 Úprava vody

Druhým stupněm osmotické elektrárny je úprava vod vtékajících do systému elektrárny. Tyto vody obsahují rozpuštěné i nerozpuštěné látky, koloidní částice a mikroorganismy. Všechny tyto elementy mohou poškodit polopropustnou membránu. Poškození membrány by vedlo k poklesu energie.

Membrány v osmotických elektrárnách jsou uzpůsobeny tak, aby mohly propouštět molekuly vody. Za tímto účelem obsahují póry o velikosti řádově 0,1 - 1 nm. Ovšem, jak již bylo zmíněno, vody vtékající do elektrárny obsahují:

- Nerozpuštěné látky (velikost větší než 1 μm) jsou suspendované částice, které se mohou samy usazovat
- Koloidní částice (velikost 1nm až 1 μm) jsou rozptýlené částice, které se samy neusazují.
- Rozpuštěné látky (velikost menší než 1 nm) se vyskytují ve formě iontů, atd.
- Mikroorganismy (velikost 0,01 – 10 nm) jako například viry, bakterie aj.

Všech těchto nechtěných složek vody se lze zbavit úpravou vody před vstupem do membrán.

4.6.1 Typy úpravy vod

Voda pro PRO elektrárnu je považována za vodu užitkovou. Do procesů úpravy užitkové vody obvykle patří:

4.6.1.1 Koagulace a flokulace

Koloidní částice, které jsou obsaženy ve vodě, se pohybují v normálních podmínkách neuspořádaným pohybem, a nespojují se do větších celků. V první fázi se do vody přidává aktivní látka, takzvaný kolaguant, který reaguje s koloidními částicemi a umožní jejich srážení do větších objektů.

4.6.1.2 Sedimentace

Sedimentace je oddělování nerozpustných částic a chemicky ošetřených koloidních částic pomocí gravitace. Pro oddělení koloidních částic musí tedy sedimentace přímo navazovat na koagulaci a flokulaci. Tento proces se obvykle provádí v nádrži, kde se voda pozdrží po určitý čas. Po určité době se tyto pevné částice usadí na dně, odkud jsou odčerpány mimo nádrž.

4.6.1.3 Písková filtrace

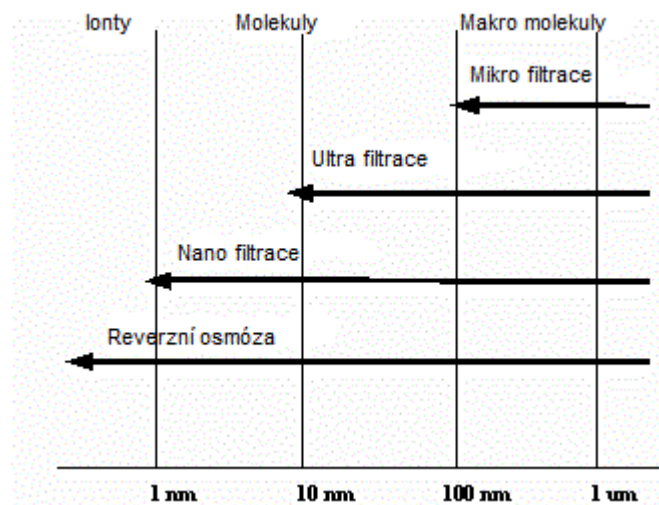
Písková filtrace je proces odstranění nerozpuštěných pevných částic nebo koloidních částic vysrážených po koagulaci. Systém se skládá s odlišných vrstev písku. Vrstvy obsahují zrna o různé hrubosti, při průtoku se nerozpuštěné látky větší než zrna písku zachytí a nepojdou dál.

4.6.1.4 GAC filtrace

GAC filtrace je proces, při kterém se rozpuštěné látky odstraní pomocí zásady, v tomto případě se jedná o granulované aktivní uhlí. Aktivní uhlí taktéž odstraňuje živiny pro bakterie.

4.6.1.5 Filtrace

Filtrace probíhá přes membrány o různých velikostech pórů (mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace). Přehledněji v následujícím obrázku:



Obr. 21: Typy filtrací[30]

4.6.1.6 Neutralizace pH

Neutralizace pH je důležitá při vypouštění vody zpět do řeky. Spočívá v přidání zásady či kyseliny dle stavu vody. Po uvedení do přípustných hodnot pH voda neškodí životnímu prostředí, nezničí stěny nádrží apod.

4.6.2 Výběr typu úpravy vody

Pokud bude do membránových modulů přiváděna kompletně čistá voda, bude opotřebení a možnost poničení membrán minimální. V tomto případě by mohl být rozměr jednoho modulu snížen na minimum a celková plocha by mohla obsahovat více membránových modulů, což by se pozitivně projevilo na získané energii. Avšak kompletní čištění vody by bylo velmi nákladné. Je proto nutné upravit konfiguraci membránového modulu, tak aby se zde neucpávaly kanály. [1]

Dalším problémem je současná situace výroby osmotické energie. Osmotické elektrárny nejsou vyzkoušeny v pilotních projektech, proto konečná optimalizace mezi konfigurací membrán, úpravou vody a finální kvalitou vody je zatím pouze v plánech.[1]

4.6.3 Celková cena

Cenu jednotlivých typů úprav vody můžeme vypočítat rovnice:

$$C_{pt} = c \cdot Q_{m^3/yr} \quad (3.13)$$

V této rovnici c zastupuje cenu na metr krychlový, pro jednotlivé typy úprav vody. $Q_{m^3/yr}$ vyjadřuje roční průtok. Ceny za jednotlivé byly brány ze zdroje [1].

	c [€/m ³]	Cena pro říční vodu	Cena pro mořskou vodu
Koalgulace	0,175	452 541 600€	905 083 200€
Sedimentace	0,2	517 190 400€	1 034 380 800€
Písková filtrace	1,1	2 844 547 200€	5 689 094 400€
GAC filtrace	0,7	1 810 166 400€	3 620 332 800€
Ultra filtrace	1,5	3 878 928 000€	7 757 856 000€

Tabulka 7: Porovnání některých typů úprav vody

Náklady na úpravu vody dosahují za jeden rok mnohem větších hodnot, než by se dalo získat výrobou elektřiny. Zainteresané společnosti věří, že aktuálně nejlepší pro potřeby osmotické elektrárny je mikrofiltrace. Ovšem nikdy to nebylo ještě otestováno ve větších podmínkách. Proto bude v tomto návrhu počítáno s použitím mikrofiltrace na vstupní vody. Cena za tuto mikrofiltraci je projektována na 0,1 €/m³. Roční cenu můžeme spočítat součtem cen pro sladkou i slanou vodu. Náklady na úpravu vody by se pohybovali okolo 775 miliónu Euro.

4.6.4 Ztráty energie

Ztráty energie pro mikrofiltraci můžeme vypočítat pomocí následující rovnice. Ztrátu 0,3 bar můžeme transformovat jako 3 metrovou výšku. Pro ztráty tedy dostáváme rovnici:

$$E_{loss} = \rho \cdot Q \cdot H \cdot g \cdot t_{h/yr} \quad (3.14)$$

Pro říční vodu získáváme ztrátu 21GWh/rok a pro mořskou 42GWh/rok. Celková ztráta je rovna 63GWh/rok.

4.7 Membránové systémy

Třetí fáze je výroba osmotické energie v membránových jednotkách, ve kterých je umístěna polopropustná membrána.

4.7.1 Základní návrh konstrukce

Typické membránové jednotky jsou válcovitého tvaru o průměru 20 centimetrů a délce 1 metr. Tyto membránové moduly mohou být uspořádány po pěti až sedmi kusech do tlakové nádoby. Do středu této nádoby teče říční voda o atmosférickém tlaku. Velká část říční vody postupně prostoupí skrz membránu do mořské vody, tyto molekuly navíc vytvoří změnu tlaku. Vtok mořské vody se nachází mimo centrální osu nádoby. Na druhé straně nádoby se nachází výtok brakické vody, která pohání turbínu a výtok ztrát říční vody, což je voda, která neprostoupí skrz membránu. Tlakové nádoby jsou poté pospojovány do sloupců a řad a tvoří membránovou soustavu.



Obr. 22: Uložení membránových jednotek

4.7.2 Charakteristika membrány

Jednou s charakteristik membrán a membránových jednotek je takzvaná „packing density“, což je poměr plochy membrány k objemu membránové jednotky. Tento poměr se u membrán pohybuje mezi 300 – 1000 m²/m³. Jelikož vztah mezi tímto poměrem, úpravou vody a kvalitou vody není ještě přesně definován. Pro potřebu bude tento poměr zvolen na 750 m²/m³.

Výkon membrány bude zvolen z experimentu, kdy bylo dosaženo výkonu 2,4 W/m². Následovat bude porovnání s předpokládaným výkonem 5 W/m². Tok skrz membránu má hodnotu 2,0·10⁻⁶ m/s. Cena za tuto membránu je stanovena na 5 €/m² s budoucím vývojem by se cena mohla snížit na 2 €/m².

4.7.3 Určení počtu soustav

Potřebná plocha membrány závisí na výkonu elektrárny a výkonu membrány, může být vyjádřen vztahem:

$$A_m = \frac{P_{ele}}{W_{PRO}} = \frac{90 \cdot 10^6}{2,4} = 37500000 m^2 \quad (3.15)$$

Počet membránových modulů určíme pomocí vztahu:

$$n_{modul} = \frac{A_m}{750 \cdot V_{modul}} \quad (3.16)$$

$$V_{modul} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot (0,2m)^2}{4} \cdot 1m = 0,03142m^3 \quad (3.17)$$

Po dosazení do předchozí rovnice získáváme počet modulů roven 1 591 549. Jak již bylo zmíněno počet modulů v jedné tlakové nádobě je roven 7. Proto potřebný počet tlakových nádob je roven 227 365. Tyto nádoby budou uspořádány do soustav. Jedna tato soustava obsahuje na výšku 20 nádob a na délku 284. Definovaná vzdálenost mezi jednotlivými nádobami je 0,1 metru.

Z následujících rovnic můžeme určit rozměry soustavy.

$$L_{soustavy} = n_{nádob} \cdot (D + 0,1) = 284 \cdot (0,2m + 0,1m) = 85,2m \quad (3.18)$$

$$H_{soustavy} = n_{nádob} \cdot (D + 0,1) = 20 \cdot (0,2m + 0,1m) = 6m \quad (3.19)$$

V jedné soustavě se tedy nachází 5680 nádob, počet soustav je roven:

$$n_{soustav} = \frac{n_{nádob}}{5680} = 40 \quad (3.20)$$

4.7.4 Plocha potřebná pro membránové soustavy

Určení plochy potřebné pro membrány je důležité pro navrhování rozměrů budov v areálu. Plocha potřebná na jednu soustavu membrán se rovná:

$$A_{soustavy} = L_{soustavy} \cdot 7 \cdot L_{modul} = 85,2m \cdot 7m = 596,4m^2 \quad (3.21)$$

Celková plocha je definována jako:

$$A_{celk} = n_{soustav} \cdot A_{soustav} = 40 \cdot 596,4m^2 = 23856m^2 \quad (3.22)$$

4.7.5 Celková cena

Celkovou cenu za membrány je možné určit jako:

$$C_m = A_m \cdot c_m \quad (3.23)$$

Kde c_m je cena membrány za m^2 . Pro současnou situaci je cena za membránu včetně tlakových nádob určena na 5 €/m². Celková cena za membrány by se pohybovala okolo 187 500 000 €. Při dalším vývoji by se cena za membrány mohla snížit na 36 000 000 €.

4.7.6 Ztráty energie

Ztráty energie v membránách odpovídají ztrátám říční vody, která neprojde skrz membránu. Tuto ztrátu můžeme odvodit dle vztahu:

$$E_{ztr;mem} = \left(1 - \frac{\frac{1}{3} \cdot (0,9 \cdot Q_{fresh} + Q_{salt})}{Q_{fresh}} \right) \cdot E_{prod} \quad (3.24)$$

Ztráty v membránové části odpovídají 19GWh / rok .

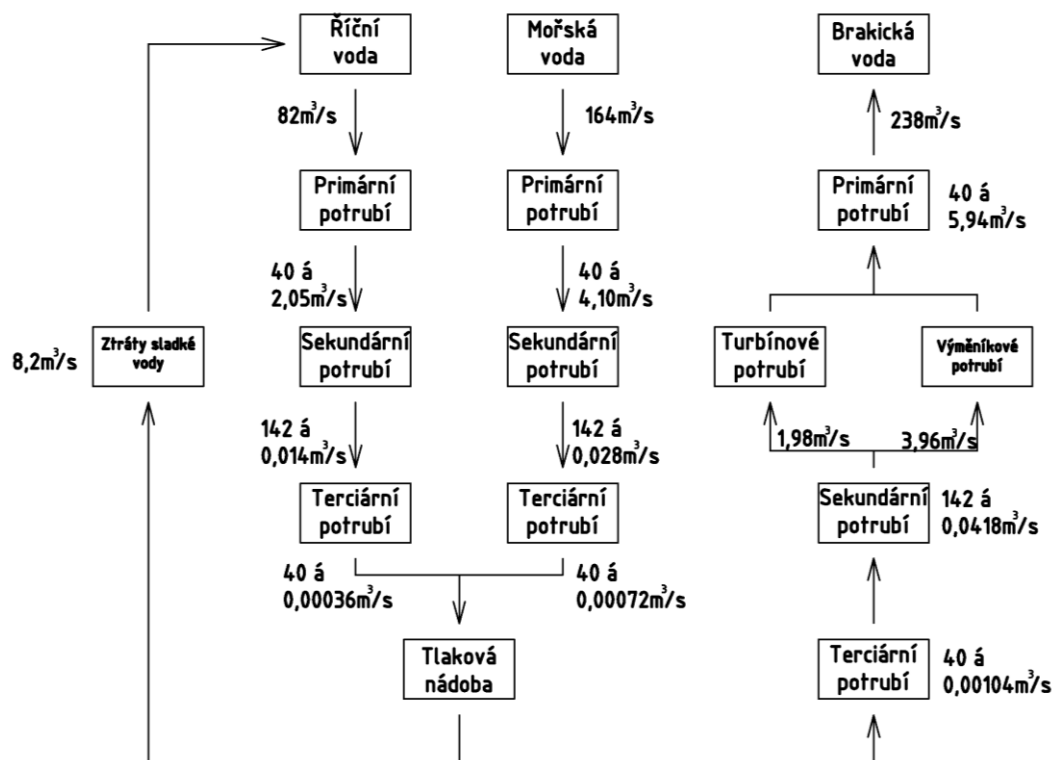
4.8 Čerpadla a turbíny

Čerpadla budou přepravovat vodu z čerpacích jímek do membránových soustav. V membránových soustavách se tvoří osmotický tlak. Tato voda s osmotickým tlakem se pomocí potrubí dopraví do turbín, které takto vzniklý rozdíl tlaku přemění na elektrickou energii.

Využití čerpadel v osmotických elektrárnách se dá očekávat jako hojné. V elektrárně je nutné přesunovat vodu do výšek i na velké vzdálenosti. Při čerpání vod z čerpacích jímek bylo uvažováno se třemi typy potrubí. Primární potrubí vedené od čerpacích jímek k jednotlivým membránovým soustavám, kde by se rozdělovalo na potrubí sekundární. Jedno sekundární potrubí by napájelo dvě řady tlakových nádob, v jedné soustavě se nachází 284 nádob v řadě, což odpovídá 142 sekundárních potrubí. Ze sekundárního potrubí vystupují terciární potrubí do jednotlivých tlakových nádob.

V jedné řadě membránové soustavy se nachází 20 tlakových nádob, tudíž z jednoho sekundárního potrubí bude vycházet 40 terciárních potrubí. Pro potřeby této bakalářské práce bylo zvoleno, že ke každé membránové soustavě bude přiřazena jedno čerpadlo na říční vodu, jedno čerpadlo na mořskou vodu, jeden tlakový výměník a jedna turbína.

Výtok brakické vody by byl rozdělen v poměru 1:2, jak již bylo zmíněno. Jedna třetina brakické vody by směřovala do turbíny a zbylé dvě třetiny do tlakového výměníku, za účelem zvýšení tlaku příchozí slané vody.



Obr. 23: Tok vody jednotlivými stupni elektrárny

Návrh rozměrů potrubí má důležitý vliv na cenu a také na energetické ztráty. Délka potrubí bude záviset na uspořádání membránových soustav v elektrárně. Pro určení vhodného průměru jednotlivých částí potrubního systému, lze použít stejný postup jako u návrhu vstupních systémů.

4.8.1 Čerpadla

Pro určení účinnosti čerpadla je důležitá takzvaná Q-H křivka. Q-H křivka se liší dle výrobců čerpadel a je dodávána společně s čerpadlem. Pro potřeby výpočtů v této bakalářské práci bude určena účinnost čerpadel na hodnotu 0,65.

4.8.2 Turbíny

Vodní turbína je dalším důležitým prvkem v osmotické elektrárně. Zde se brakická voda zbavuje osmotické tlaku nabytého v tlakových nádobách ve prospěch turbíny a generátoru. Pro účel této bakalářské práce zvolím kombinovanou účinnost turbíny a generátoru na 0,8.

4.8.3 Výpočet potrubí

Pro určení ztrát na potrubí je třeba znát návrh potrubí. Návrh potrubí je podobný jako u prototypní elektrárny, který je vyobrazen na Obr. 22.

Uspořádání membránových soustav na ploše elektrárny připadá v úvahu ve čtyřech řadách po deseti soustavách. Na trase každého potrubí se nachází dvě kolena o devadesáti stupních a dvě rozdělení průtoků (z primárního na sekundární a ze sekundárního na terciární). Součinitelé místních ztrát pro 90° koleno 1,3. Při jednom rozdělení byl ztrátový součinitel stanoven na 1.

4.8.3.1 Primární potrubí

Délky primárního potrubí záleží na uspořádání membránových soustav. Při předpokladu, že čerpací jímky se nachází na okrajích areálu, poté návrh uspořádání elektrárny vyjádřen na následujícím schématu.

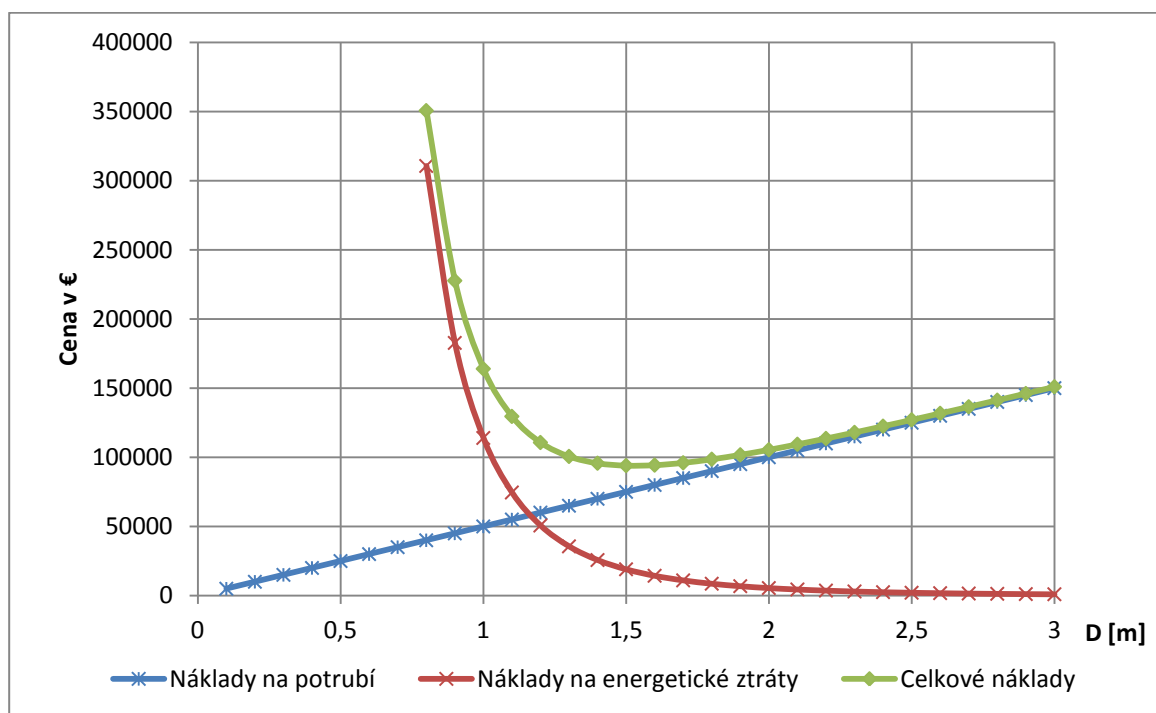
Potrubí se sladkou vodou vedoucí z levé strany by dosahovalo čtyř různých délek. Tyto délky jsou zaznamenány v tabulce. Výpočet optimálního průměru je použito rovnice (3.11). Za určení je potřeba zvážit jak cenu potrubí, tak cenu za ztráty energie. Tyto ceny můžeme určit pomocí následujících vzorců. Cena za potrubí:

$$C_{pipes} = 500 \cdot D \cdot L \quad (3.25)$$

Kde D je průměr potrubí a L délka, která je určena z rozložení membránových soustav. Cena za ztráty energie:

$$C_{energy} = \frac{\Delta H \cdot Q \cdot \rho \cdot g}{\eta_{pump}} \cdot t_{hrs/yr} \cdot C_{€/kWh} \quad (3.26)$$

V této rovnici ΔH je rozdíl výšek, η_{pump} je účinnost čerpadla, $t_{hrs/yr}$ je doba provozu a $C_{€/kWh}$ je cena za jednu kWh v eurech. Jelikož se lokace nachází ve Velké Británii a celý výpočet je prováděn v eurech, bylo k určení ceny energie použito přepočtu v aktuálním měnovém kurzu ze dne 12. 5. 2014, průměrná cena dle British Gas Company je 10,8 pence.[31] Cena byla tedy určena na 0,13 €. Pro minimalizování nákladu musí být součet těchto dvou nákladů co nejmenší.



Obr. 24: Graf nákladů na primární potrubí na říční vodu

Optimální průměr pro primární říční potrubí byl pro zjednodušení zvolen 1,45 m. Délka záleží na umístění soustavy, jmenovitě 100, 200, 300 a 400 metrů.

Primární potrubí na mořskou vodu dosahuje větších průtoků. Optimální průměr primárního slanovodního potrubí byl zvolen na 2 m. Délka tohoto potrubí se pohybuje dle umístění soustavy, na kterou je přiváděno, hodnoty jsou stejné jako u říčního potrubí.

4.8.3.2 Sekundární potrubí

Pro určení optimálního průměru sekundárního potrubí je použito poměru mezi průtoky primárním a sekundárním potrubím.

$$Q_{pri} = n_{sek} \cdot Q_{sek} \quad (3.27)$$

Víme, že každé primární potrubí se rozděluje na 142 sekundárních. Po dosazení a odvození získáváme.

$$D_{sek} = \sqrt{\frac{1}{142} \cdot D_{pri}^2} \quad (3.28)$$

Optimální průměr sekundárního říčního potrubí byl zvolen 0,12 metru. Délka je pro všechny potrubí stejná a to 15 metrů. Pro potrubí na mořskou vodu byl zvolen průměr 0,17 metru délka tohoto potrubí je rovna 25 metrům.

4.8.3.3 Terciární potrubí

Určení průměru terciárního potrubí probíhá stejně jako u sekundárního, za použití modifikované rovnice, protože zde se nachází 40 terciárních potrubí z jednoho sekundárního potrubí.

$$D_{ter} = \sqrt{\frac{1}{40} \cdot D_{sek}^2} \quad (3.29)$$

Délka všech říčních terciárních potrubí je stejná 0,25 metru. Optimální průměr byl zvolen 0,02 metru. Slanovodní terciární potrubí má délku 0,75 metru a průměr byl zvolen 0,25 metru.

4.8.3.4 Návrh potrubí na brakickou vodu

Brakická voda vystupuje z tlakových nádob v terciárních potrubích. Po napojení do sekundárního jedna třetina zamíří do turbínového potrubí a dvě třetiny to výměňkového potrubí. Postup pro navrhování je obdobný jako u říčního či slanovodního potrubí. Výsledky jsou dány v tabulce v sekci 4.8.4.3.

4.8.4 Náklady na jednotlivé části

4.8.4.1 Potrubí na říční vodu

Celkové náklady za potrubí uvnitř elektrárny můžeme vyčíslit pomocí rovnice. Náklady na primární říční potrubí jsou uvedeny v tabulce.

Soustava	Délka[m]	Průměr[m]	Cena	Počet	Cena celkem
1	100	1,45	72 500 €	10	725 000 €
2	200	1,45	145 000 €	10	1 450 000 €
3	300	1,45	217 500 €	10	2 175 000 €
4	400	1,45	290 000 €	10	2 900 000 €
Suma					7 250 000 €

Tabulka 8: Náklady na primární říční potrubí

Určení nákladu na sekundární a terciární potrubí bylo provedeno pomocí těchto vzorců:

$$C_{sek} = 500 \cdot D \cdot L \cdot n_{sek} \cdot n_{soustav} = 5112000€ \quad (3.30)$$

$$C_{ter} = 500 \cdot D \cdot L \cdot n_{ter} \cdot n_{sek} \cdot n_{soustav} = 568000€ \quad (3.31)$$

Celkové náklady na říční potrubí jsou určeny přibližně na 13 000 000 €.

4.8.4.2 Potrubí na mořskou vodu

Postup výpočtů nákladu na potrubí na mořskou vodu je totožný s postupem pro říční potrubí. Celkové náklady na potrubí pro mořskou vodu jsou stanoveny na 20 000 000 €.

4.8.4.3 Potrubí na brakickou vodu

Návrh průměrů a cena pro potrubí na brakickou vodu se nachází v tabulce:

Potrubí	Délka [m]	Průměr [m]	Cena za kus	Celková cena
Primární	185	2,3	212 750 €	8 510 000 €
Turbínové	65	1,8	58 500 €	2 340 000 €
Výměňkové	100	2,2	110 000 €	4 400 000 €
Sekundární	10	0,25	1 250 €	7 100 000 €
Terciární	0,5	0,04	10 €	2 272 000 €
Suma				24 622 000 €

Tabulka 9: Návrh průměru a cena potrubí pro brakickou vodu

4.8.4.4 Čerpadla

Pro výpočtu nákladů na čerpadla, lze v tomto případě použít tento vztah:

$$C_{čerp} = 1,7 \cdot 10^5 \cdot n_{čerp} \cdot H^{0,18} \cdot D^2 \quad (3.32)$$

Kde H je čerpací výška, v tomto případě bude zvolena 10 m. Náklady se tedy budou pohybovat okolo 22 000 000 €. Tuto formuli můžeme aplikovat také na tlakové výměníky, kterých se nachází stejný počet jako čerpadel. Celkové náklady tedy budou 44 000 000 €.

4.8.4.5 Turbíny

Celková cena za turbíny byla zhodnocena na 35 000 000 €. [1]

4.8.5 Celkové náklady

Po sečtení všech položek v této části dostáváme celkovou cenu rovnou asi 140 000 000 €.

4.8.6 Ztráty energie

Ztráty energie pro transport vody můžeme určit dle vzorce:

$$E_{transport} = \frac{\Delta H \cdot Q \cdot \rho \cdot g}{\eta_{pump}} \cdot t_{hrs/yr} \quad (3.33)$$

Čerpací výška je opět volena na 10 m. Celkové ztráty energie se pro oba typy potrubí rovnají 325GWh/rok . Další ztráty nastávají v turbíně a generátoru, pro určení těchto ztrát můžeme použít vztah:

$$E_{ztr:turb} = E_{prod} \cdot (1 - \eta_{turb}) \quad (3.34)$$

Po dosazení se ztráty rovnají $85,5\text{GWh/rok}$.

4.9 Dodávána energie do sítě

Pro zjištění celkové energie dodávané do elektrické sítě potřebujeme odečíst od produkované energie energetické ztráty zmíněné v jednotlivých kapitolách. Pro přehlednost jsou ztráty rozepsány v tabulce:

	Energie [GWh/rok]	Podíl z produkované energie
Počáteční produkce	570	100%
Úprava vody	-63	-11%
Membránové soustavy	-19	-3%
Transport vody	-325	-57%
Turbína	-85,5	-15%
Konečná produkce	77,5	14%

Tabulka 10: Shrnutí energetických ztrát

Celková produkce osmotické elektrárny je $77,5\text{GWh/rok}$, což odpovídá 14 %, tato energie umožňuje zásobovat 16 850 domácností při průměrné spotřebě $4,6\text{MWh/rok}$ [32].

4.10 Shrnutí nákladů

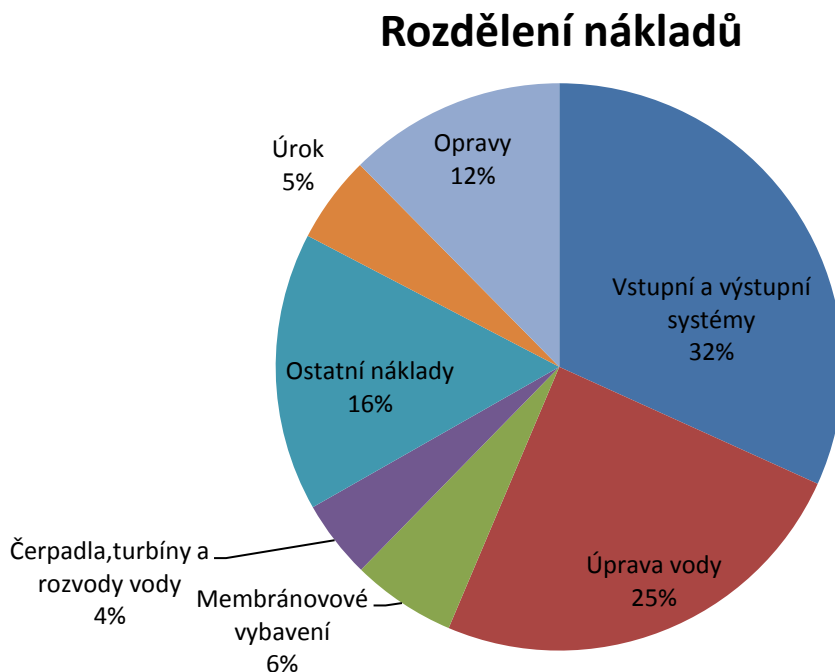
V této části budou sečteny všechny náklady na stavbu elektrárny. Položky, které nebyly rozebrány v předchozích částech, jsou náklady na stavbu budov a čerpacích jímek, připojení k elektrické síti a další výdaje menší výdaje. Tyto výdaje, z nichž největší bude jistě postavení budov, budou zaokrouhleny na 500 000 000 €. Tyto výdaje se v tabulce shrnutí nákladů vyskytují jako ostatní náklady. Celkové výdaje na stavbu elektrárny jsou rozepsány v této tabulce:

Část elektrárny	Náklady
Vstupní a výstupní systémy (4.5.4)	1 000 000 000 €
Úprava vody (4.6.3)	775 000 000 €
Membránové vybavení (4.7.5)	187 000 000 €
Čerpadla, turbíny a rozvody vody (4.8.5)	140 000 000 €
Ostatní náklady	500 000 000 €
Celkem	2 602 000 000 €

Tabulka 11: Shrnutí celkových nákladů

5. Závěr

Osmotická elektrárna v uvedeném návrhu byla navrhována s výkonem 90 MW. Ovšem celková produkovaná energie je mnohem nižší. Prvním z důvodů je omezený příjem říční vody, kdy řeka Tay ve Skotsku, na které se potencionální elektrárna nachází, dosahuje projektovaného průtoku pouze v 75 % času roku. Mezi další důvody patří ztráty energie na jednotlivých částech elektrárny, jak ukazuje Tabulka 10. Celková produkovaná energie byla stanovena na $77,5GWh/rok$. Životnost této elektrárny je orientačně stanovena na 50 let. Při výpočtu s návratností za 15 let provozu dostáváme cenu za energii rovnou $2,7€/kWh$. Rozdělení nákladu na cenu za energii je vyjádřena v následujícím grafu:



Obr. 25: Rozdělení nákladu

Cena $2,7€/kWh$ je velmi daleko od tržní ceny odpovídající $0,13€/kWh$. Proto není osmotická elektrárna konkurence schopná.

Nejnákladnější částí jsou vstupní a výstupní systémy, v téhle práci je to dáno hlavně velkou vzdáleností, na kterou jsou přepravovány vstupní vody. Tento problém se dotýká i zvolené lokace, kdy to z výše popsaných důvodů (4.2.2), bylo nutné vybrat takto velké vzdálenosti. Pro snížení těchto nákladů by bylo vhodné snížit délku potrubí, případně minimalizovat samotné náklady na stavbu tohoto potrubí. Druhou největší položkou jsou náklady na úpravu vody. Tato oblast zůstává stále neotestována. Snížení těchto nákladů je podmíněno otestováním různých typů úprav vody pro pilotní elektrárnu.

Získávání energie pomocí reverzní osmózy je rychle se rozvíjející se obor obzvláště v posledním desetiletí, pořád je ale poměrně nedokonalý. Při tomto návrhu elektrárny, byla zjištěna účinnost pouhých 14 %. Zvýšení účinnosti a snížení nákladů by proto měl být další postup zainteresovaných firem. Vzhledem k úplně novému typu membrán, kdy ještě přesně není dořešena jejich konfigurace, se případným zájemcům otvírá úplně nové odvětví, do kterého mohou zaměřit výzkum. Podobná oblast je úprava vody, zde je také kompletně neotestována a neznámá optimální konfigurace úpravny vod.

V aktuálním stavu ovšem osmotické elektrárny nejsou finančně výhodné, jejich vývoj je pomalý a nepodařilo se dosáhnout stavu, kdy by se osmotická elektrárna stala konkurenci schopnou v dohledném období. Převážně z těchto důvodů se norská společnost Statkraft, která byla u všech důležitých akcí týkající se osmotických elektráren, například otevření prototypu elektrárny v roce 2009, se rozhodla na konci roku 2013 oznámit zastavení financování tohoto projektu. Statkraft plánoval v letošním roce začít se stavbou pilotní osmotické elektrárny.

Do budoucna se předpokládalo, při vyhlazení všech nedostatků, s cenou okolo $0,20\text{€} / \text{kWh}$. Tato cena by učinila osmotickou elektrárnu finančně výhodnou, a mohlo by se stát významným zdrojem energie po celém světě. Avšak do této doby čeká vývoj osmotické energie velmi dlouhá a trnitá cesta.

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] KLEITERP, Rick. *The feasibility of a commercial osmotic power plant*. Delft, 2012. Dostupné z: http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:fbaa8d2f-3c01-45e3-8473-9a2ccd2b9a67/MSc_Thesis_R_Kleiterp_Report.pdf. Master thesis. Delft University of Technology. Vedoucí práce Vrijling, J.K. · Molenaar, W.F. · Vreeburg, J.H.G.
- [2] ACHILLI, Andrea a Amy E. CHILDRESS. Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation — Review. *Desalination*. 2010, vol. 261, issue 3, s. 205-211. DOI: 10.1016/j.desal.2010.06.017. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916410004091>
- [3] HASSON, David. In memory of Sidney Loeb. *Desalination*. 2010, vol. 261, issue 3, s. 203-204. DOI:10.1016/j.desal.2010.06.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916410004121>
- [4] HELFER, Fernanda, Charles LEMCKERT a Yuri G. ANISSIMOV. Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review. *Journal of Membrane Science*. 2014, vol. 453, s. 337-358. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.10.053. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037673881300865X>
- [5] Osmosis. In: *Encyclopædia Britannica Online* [online]. Encyclopædia Britannica Inc., 2014, 2013-03-26 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/434057/osmosis>
- [6] MCNAUGHT, Alan D a Andrew WILKINSON. *Compendium of chemical terminology: IUPAC recommendations*. 2nd ed. Malden, MA, USA: Blackwell Science, 1997, vii, 450 p. ISBN 08-654-2684-8.
- [7] NORMAN, R. S. Water Salination: A Source of Energy. *Science*. 1974-10-25, vol. 186, issue 4161, s. 350-352. DOI: 10.1126/science.186.4161.350. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.186.4161.350>
- [8] ACHILLI, Andrea, Tzahi Y. CATH a Amy E. CHILDRESS. Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation. *Journal of Membrane Science*. 2009, vol. 343, 1-2, s. 42-52. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.07.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738809005134>
- [9] JIA, Zhijun, Baoguo WANG, Shiqiang SONG a Yongsheng FAN. Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, vol. 31, s. 91-100. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.049. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113007983>
- [10] VAN DER ZWAN, Sam, Ivo W.M. POTHOF, Bastiaan BLANKERT a Julie I. BARA. Feasibility of osmotic power from a hydrodynamic analysis at module and plant scale. *Journal of Membrane Science*. 2012, vol. 389, s. 324-333. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.10.044. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738811008040>
- [11] STATKRAFT. *Pre-treatment* [online]. [2008] [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.statkraft.com/about-statkraft/innovation/osmotic-power/pre-treatment.aspx>

- [12] LOEB, Sidney, Fred VAN HESSEN a Dinah SHAHAF. Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*. 1976, vol. 1, s. 249-269. DOI:10.1016/S0376-7388(00)82271-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738800822711>
- [13] HONDA, Takeo. Development of a Four-Partitioned Permeator for Salinity Power Generation. *Bulletin of the Society of Sea Water Science*. 1989, roč. 42, č. 5, s. 233-240. DOI: 10.11457/swsj1965.42.233. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/swsj1965/42/5/42_233/_article0
- [14] THORSEN, Thor a Torleif HOLT. The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2009, vol. 335, s. 103-110. DOI:10.1016/j.memsci.2009.03.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037673880900180X>
- [15] LOEB, S a G.D MEHTA. A two-coefficient water transport equation for pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*. 1978, vol. 4, s. 351-362. DOI: 10.1016/S0376-7388(00)83313-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037673880083313X>
- [16] SAITO, Keiichiro, Morihiro IRIE, Shintaro ZAITSU, Hideyuki SAKAI, Hidechito HAYASHI a Akihiko TANIOKA. Power generation with salinity gradient by pressure retarded osmosis using concentrated brine from SWRO system and treated sewage as pure water. *Desalination and Water Treatment*. 2012, vol. 41, 1-3, s. 114-121. DOI: 10.1080/19443994.2012.664696. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2012.664696>
- [17] LI, Xue a Tai-Shung CHUNG. Thin-film composite P84 co-polyimide hollow fiber membranes for osmotic power generation. *Applied Energy*. 2014, vol. 114, s. 600-610. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.037. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191300857X>
- [18] Flat sheet membrane. *Statkraft* [online]. 2010 [cit. 2014-04-3]. Dostupné z: www.statkraft.com/about-statkraft/innovation/osmotic-power/flat-sheet-membrane.aspx
- [19] SKILHAGEN, Stein Erik, Jon E. DUGSTAD a Rolf Jarle AABERG. Osmotic power — power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients. *Desalination*. 2008, vol. 220, 1-3, s. 476-482. DOI: 10.1016/j.desal.2007.02.045. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916407006467>
- [20] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Energy Policies of Iea Countries, United Kingdom 2012*. S.l.: Organization for Economic, 2012. ISBN 978-926-4170-865.
- [21] MAAR, Marie, Eva Friis MØLLER, Jesper LARSEN, Kristine Skovgaard MADSEN, Zhenwen WAN, Jun SHE, Lars JONASSON a Thomas NEUMANN. Ecosystem modelling across a salinity gradient from the North Sea to the Baltic Sea. *Ecological Modelling*. 2011, vol. 222, issue 10, s. 1696-1711. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.03.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438001100113X>

- [22] *Centre for Ecology & Hydrology* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ceh.ac.uk/index.html>
- [23] Comparison Hydrodynamics and Salinity of Tide Estuaries; Elbe, Humber, Schelde and Weser. In: *FLANDERS MARINE INSTITUTE* [online]. 2011 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: www.vliz.be/imisdocs/publications/227966.pdf
- [24] *Encyklopedie Zeměpis světa*. V Praze: Columbus, 2002, 512 s. ISBN 80-901-7276-8.
- [25] EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Basic Information about Estuaries* [online]. 2012 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://water.epa.gov/type/oceb/nep/about.cfm>
- [26] River Tay. In: *Encyclopædia Britannica Online* [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/584746/River-Tay>
- [27] MCMANUS, John. Salinity and suspended matter variations in the Tay estuary. *Continental Shelf Research*. 2005, vol. 25, 5-6, s. 729-747. DOI: 10.1016/j.csr.2004.11.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278434304003085>
- [28] TURNPENNY, A.W.H., J. COUGHLAN, B. NG, P. CREWS, R.N. BAMBER a P. ROWLES. *Cooling water options for the new generation of nuclear power stations in the UK*. Bristol: Environment Agency, 2010. ISBN 978-184-9111-928.
- [29] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2037-5.
- [30] LENNTECH. *Membrane Technology* [online]. 2014 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/membrane-technology.htm>
- [31] Gas & electricity tariff prices per unit. *UK Power* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.ukpower.co.uk/home_energy/tariffs-per-unit-kwh#.U2_x6Pl_sjF
- [32] Energy in Scotland Compendium 2014. In: *The Scottish Government* [online]. 2014 [cit. 14.5.2014]. Dostupné z: <http://www.scotland.gov.uk/Topics/Statistics/Browse/Business/Energy/Compendium2014>
- [33] *Global sea temperature* [online]. 2014 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.seatemperature.org/>

7. Seznam použitých symbolů a zkratk

CA	Celulózoacetát	
FO	Osmóza (Forward osmosis)	
HF	Membrána z dutých vláken (Hollow fibre)	
NaCl	Chlorid sodný	
TFC	Membrána z tenkých vrstev (Thin-film)	
PRO	Pressure retarded osmosis	
RED	Reverzní elektrická dialýza	
a	Aktivita rozpouštědla	
A	Obsah	[m ²]
A	koeficient membrány	[ms ⁻¹ Pa ⁻¹]
C	cena	[-]
C	koncentrace	[mol m ⁻³]
d	tloušťka	[m]
D	průměr	[m]
D	Difúzní koeficient	[-]
E	Energie	[J]
F	Faradayova konstanta	[C·mol ⁻¹]
g	gravitační zrychlení	[m s ⁻²]
h; H	výška	[m]
k	Součinitel přestupu hmoty	[-]
J	Tok	[mol m ⁻² s ⁻¹]
L	délka	[m]
M	Molární hmotnost	[kg·mol ⁻¹]
N	počet	[-]
P	Výkon	[W]
p	Tlak	[Pa]
Q	Průtok	[m ³ s ⁻¹]

R	Univerzální plynová konstanta	$[J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$
R	Elektrický odpor	$[\Omega]$
S	Odpor přestupu soli	$[m]$
t	čas	$[s]$
T	Termodynamická teplota	$[K]$
v	rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
V	Parciální molární objem	$[m^3]$
Y	celkové ztráty	$[-]$
x	tloušťka pórovitosti vrstvy	$[m]$
z	Valence iontů	$[-]$
α	průměrná selektivita membrán	$[-]$
Δ	diference	$[-]$
H	účinnost	$[-]$
κ	konduktivita	$[S \cdot m^{-1}]$
ξ	součinitel místních ztrát	$[-]$
π	osmotický tlak	$[Pa]$
ρ	hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
τ	parametr zkroucení	$[-]$
φ	pórovitost	$[-]$

Zkratky a symboly použité v indexech

A	entita A, rozpouštědlo
AEM	membrána akceptující anionty
B	entita B, rozpouštěné látky
BRA	brakická voda
CEM	membrána akceptující kationty
ČERP	čerpadla
EL	elektroda
ELE	elektrárna
FRESH	říční voda

LOAD	zatížená strana
LOSS	ztráty
IN	vstupní
MAX	maximální
MIN	minimální
OSM	osmotický
PŘI	primární
PRO	produkovaná
REAL	reálná
RIVER	říční
SALT	slaná voda
SEA	mořská voda
SEK	sekundární
STACK	soustava
TER	terciární
THEO	teoretická
W	voda

8. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: První návrh na získávání energie za pomoci osmózy [7]	15
Obr. 2: Přehled čtyř osmotických jevů [4]	17
Obr. 3: Schéma RED [1]	18
Obr. 4: Idealizované schéma osmotické elektrárny [9]	21
Obr. 5: Elektrárna u ústí řeky do moře[9]	23
Obr. 6: Elektrárnapodúrovni moře[9]	23
Obr. 7: Koncentrační polarizace	24
Obr. 8: Spirálové uspořádání TFC membrány [1]	26
Obr. 9: Graf dosažených výkonů	27
Obr. 10: Lokace vybrané ve Velké Británii	30
Obr. 11: Průtok během roku 2012[22]	31
Obr. 12: Očekávaný průtok během roku v procentech času[22]	32
Obr. 13: Mapa ústí řeky Tay	33
Obr. 14: Salinita v estuáru při měření v roce 1986[27]	33
Obr. 15: Projektované umístění elektrárny	34
Obr. 16: Graf průběhu průměrných teplot během roku	34
Obr. 17: Praktická osmotická energie	36
Obr. 18: Diagram toků elektrárnou	38
Obr. 19: Umístění vstupních a výstupních systému	39
Obr. 20: Řez příčným průřezem potrubí	40
Obr. 21: Typy filtrací[30]	43
Obr. 22: Uložení membránových jednotek	45
Obr. 23: Tok vody jednotlivými stupni elektrárny	47
Obr. 24: Graf nákladů na primární potrubí na říční vodu	48
Obr. 25: Rozdělení nákladu	53
Tabulka 1: Potenciál PRO elektráren dle STATKRAFT[1]	27
Tabulka 2: Teoretická energie získatelná osmózou z některých hlavních řek světa.[4] ...	28
Tabulka 3: Porovnání potenciálních lokací	30
Tabulka 4: Tabulka k výpočtu teoretického osmotického tlaku	35
Tabulka 5: Praktický rozdíl osmotického tlaku	35
Tabulka 6: Analýza rozměrů potrubí	41
Tabulka 7: Porovnání některých typů úprav vody	44
Tabulka 8: Náklady na primární říční potrubí	50
Tabulka 9: Návrh průměru a cena potrubí pro brakickou vodu	50
Tabulka 10: Shrnutí energetických ztrát	51
Tabulka 11: Shrnutí celkových nákladů	51